



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/09.02.18.19-TDI

MODELAGEM DA DINÂMICA DO MANGUEZAL FRENTE À ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR

Denilson da Silva Bezerra

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Silvana Amaral Kampel, e Milton Kampel, aprovada em 25 setembro de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GUJEH8>>

INPE
São José dos Campos
2014

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/09.02.18.19-TDI

MODELAGEM DA DINÂMICA DO MANGUEZAL FRENTE À ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR

Denilson da Silva Bezerra

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Silvana Amaral Kampel, e Milton Kampel, aprovada em 25 setembro de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GUJEH8>>

INPE
São José dos Campos
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Bezerra, Denilson da Silva.

B469m Modelagem da Dinâmica do manguezal frente à elevação do nível do mar / Denilson da Silva Bezerra. – São José dos Campos : INPE, 2014.

xxii + 98 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/09.02.18.19-TDI)

Tese (Doutorado em Ciências do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Orientadores : Drs. Silvana Amaral Kampel, e Milton Kampel.

1. Mudanças climáticas. 2. Elevação do nível do mar. 3. Manguezal. 4. Modelo. 5. Autômato. I.Título.

CDU 551.468.3

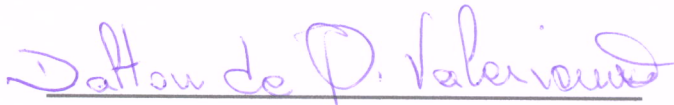


Esta obra foi licenciada sob uma [Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

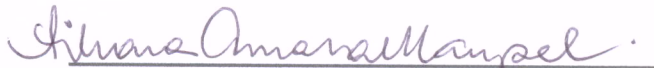
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Ciência do Sistema Terrestre


Dr. Dalton de Morisson Valeriano


Presidente / INPE / SJC Campos - SP

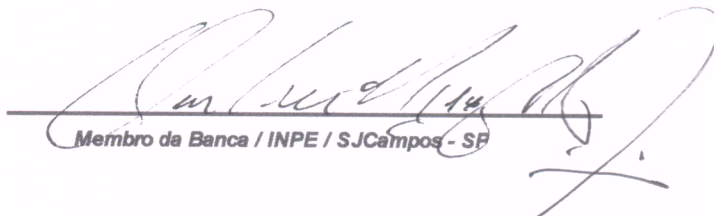
Dra. Silvana Amaral Kampel


Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

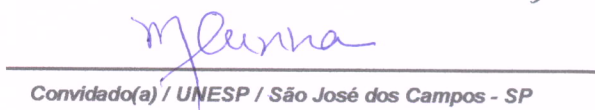
Dr. Milton Kampel


Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

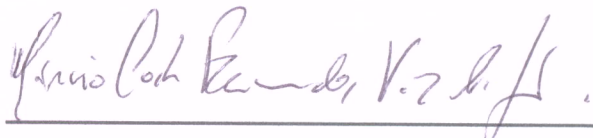
Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro


Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Marília Cunha Lignon


Convidado(a) / UNESP / São José dos Campos - SP

Dr. Márcio Costa Fernandes Vaz dos Santos


Convidado(a) / UFMA / São Luís - MA

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

☒ unanimidade

Aluno (a): **Denilson da Silva Bezerra**

São José dos Campos, 25 de Setembro de 2014

denilson da Silva Bezerra

“O mar sem o manguezal seria semelhante a uma árvore na ausência de suas raízes.”

Mangrove Action Project (MAP).

A toda a minha amada família, em especial a meu pai Teófilo Oliveira Bezerra e a minha querida mãe Rosemary de Jesus da Silva Bezerra.

AGRADECIMENTOS

Ao meu bondoso Deus por sua ajuda e companhia em todos os momentos da minha vida.

A meus pais (Rosemary de Jesus da Silva Bezerra e Teófilo Oliveira Bezerra) por todo o amor, carinho e presença que direcionaram a minha pessoa em todas as fases da minha vida.

A toda a minha amada família e amigos, companheiros de todas as horas e momentos.

À Dr.(a) Silvana Amaral por sua valiosa orientação e amizade no desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Dr. Milton Kampel por todo apoio e também por sua belíssima orientação e amizade.

Ao Dr. Pedro de Ribeiro de Andrade por sua fundamental ajuda e paciência comigo em relação ao código do modelo.

À minha noiva Janaina Lima pelo carinho e amor em todas as horas.

Ao meu amigo Alexandre Jardim por sua também valiosa ajuda com o código do modelo.

Aos meus amigos e companheiros da Batcaverna/INPE.

Aos meus amigos e companheiros do curso de Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre (CST), em especial aos amigos da turma de 2010.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Aos professores/pesquisadores/ funcionários do INPE.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado que subsidiou o desenvolvimento da presente pesquisa.

RESUMO

A elevação do nível do mar é um efeito característico das mudanças climáticas na zona costeira. O manguezal é um ecossistema particularmente vulnerável a este processo, devido a sua posição intermediária entre o mar e o continente. O Brasil possui, simultaneamente, a segunda maior área total, e a maior área contínua de manguezal do mundo presente no litoral Norte brasileiro (na Amazônia legal), entre a cidade de Belém/PA e a Ilha do Maranhão que é composta por 4 (quatro) cidades (São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa). Estudar o padrão de resposta do manguezal a elevação do nível do mar no território brasileiro é um desafio. As pesquisas direcionadas a essa temática tem sido voltadas em sua maioria ao uso do sensoriamento remoto e a observações locais. O presente estudo propõe uma abordagem metodológica para simular o padrão de resistência do manguezal a elevação do nível do mar, usando modelagem espacialmente explícita baseada em autômatos celulares. O modelo proposto denominado de BR-MANGUE é inicialmente por seu modelo conceitual, as regras para a interação entre os elementos e os procedimentos metodológicos para sua implementação computacional. Foi realizada uma simulação considerando 88 (oitenta e oito) eventos de elevação de 0,011 a 0,97 m, conforme uma progressão aritmética de razão 0,011 m para o intervalo de tempo de 2012 a 2100. A área de estudo de caso é a Ilha do Maranhão que contém extensa área de manguezal, além de ser densamente ocupada. Os resultados apresentados demonstraram que o manguezal teve 13 (treze) padrões de resistência, sendo que o primeiro foi caracterizado por um intervalo de elevação de 0,01 a 0,13 m, referente ao período de 2013 a 2024. Nesse intervalo, a área de manguezal permaneceu aproximadamente constante, com valores da ordem de 17.711 ha para a área total, e 16.916 ha de área remanescente, o que corresponde a 4,49% (795 ha) de expansão. Após o primeiro padrão de resistência, o manguezal apresentou 12 (doze) padrões subsequentes de resistência e declínio de área até o final da simulação. Os resultados obtidos por meio do BR-MANGUE sugerem que experimentos de modelagem podem ser usados para promover uma melhor compreensão dos padrões de respostas do manguezal a potenciais eventos de elevação do nível do mar, principalmente em áreas de uso e ocupação complexos como na zona costeira brasileira.

MODELING OF THE PATTERN OF MANGROVE RESISTENCE TO SEA- LEVEL RISE

ABSTRACT

The sea-level rise is a characteristic effect of climatic changes in coastal zone. The mangrove ecosystem is particularly vulnerable to this process, due to its intermediate position between the sea and the continent. The Brazil has, simultaneously, the second largest total area, and the largest area of continuous mangrove present in the Brazilian north coast (in Amazonia), between the city of Belém / PA and the Maranhão Isle which is composed of four (4) cities (São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar and Raposa). To study the response pattern of the mangrove to sea-level rise in Brazilian territory is a challenge, the directed researches this thematic has been geared mostly for use of remote sensing and local observations. The present study proposes a methodological approach to simulate the resistance pattern of the mangrove to sea-level rise, using spatially explicit modeling based on cellular automata. The proposed model is called the BR-MANGROVE; initially we present the conceptual model, the rules for the interaction between the elements and the methodological procedures for computer implementation. The simulation considers 88 (eighty-eight) events of elevation from 0.011 to 0.97 m according an arithmetic progression of reason 0.011 m for the time interval from 2012 to 2100. The case study area is the Maranhão Island which contains extensive mangrove area, and is densely occupied. The results presented demonstrated that mangrove had 13 (thirteen) resistance patterns, where the first was characterized by an elevation range from 0.01 to 0.13 m for the period 2013-2024. In this interval, the mangrove area remained approximately constant, with values of the order of 17,711 ha for the total area, and 16,916 ha of remaining area, which corresponds to 4.49% (795 ha) of expansion. After the first resistance pattern, mangrove showed 12 (twelve) subsequent patterns of resistance and decline of area until the end of the simulation. The results obtained through the BR-MANGROVE suggest that modeling experiments can be used to promote a better understanding of patterns of the mangrove responses to potential events of sea-level rise, especially in areas of complex use and occupation as in the coastal zone Brazilian.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Distribuição geográfica global das áreas de manguezal (ha) por país.	5
Figura 2.2 - Mecanismos adaptativos do manguezal para sua ocorrência na área de influência das marés. (A) – Excreção de sal pelas folhas no gênero <i>Avicennia</i> . Lenticelas que proporcionam a respiração aérea em Rizóforos presentes no gênero <i>Rhizophora</i> . 6	6
Figura 2.3 - Mapa de localização da Costa de Macromaré de Manguezais da Amazônia (CMMA).	8
Figura 2.4 - Exemplos de interações entre populações tradicionais com ambientes de manguezais.	11
Figura 2.5 - Manguezais destruídos pela ação de ciclones no Vietnã em janeiro de 2010.	14
Figura 2.6 - Zona costeira brasileira.	18
Figura 2.7 - Compartimento da costa brasileira.	20
Figura 2.8. Cenários para o padrão geral de resposta do manguezal a alterações no NMRM: (A) – Cenário de não elevação; (B) – Cenário de retração e (C) – Cenário de elevação.	22
Figura 2.9 - Um exemplo de zonas de colonização do manguezal conforme distribuição da maré e declividade do terreno.	24
Figura 2.10 - A - Processo e feição morfológica decorrentes da acreção costeira no Cabo Orange (Amapá, norte do Brasil): crescimento do cabo lamoso com sucessão de vegetação pioneira e jovem de mangue estabelecida. B – Linha de costa em erosão ao longo do cabo Cassiporé (Amapá).	25
Figura 2.11 - Características dos três modelos para a representação das árvores e disponibilidade de fatores abióticos.	33
Figura 2.12 - Modelo SELVA MANGRO para simulação de processos de sucessão ecológica com três espécies de mangues em resposta a cenários de elevação do nível do mar no sul da Flórida, EUA.	34
Figura 3.1 - Etapas metodológicas desenvolvidas durante a pesquisa	37
Figura 3.2 - Esquema geral do modelo conceitual BR-MANGUE considerando as quatro componentes – elevação do NMRM, Dinâmica do manguezal, Uso e ocupação do solo e restrições ambientais.	39
Figura 3.4 - Vulnerabilidade do litoral Norte brasileiro às mudanças climáticas.	48

Figura 3.5 - Eventos de preamar (A) e baixa-mar (B) simulados para o Porto do Itaqui (São Luís, MA) em 2012.	49
Figura 3.6 - Espaço celular vazio correspondente ao perímetro da Ilha do Maranhão.	51
Figura 3.7 - Espaço celular preenchido com as formas de uso e ocupação do solo que caracterizam o estado inicial das células.	52
Figura 3.8 - Espaço celular preenchido com o atributo classe de solos.....	53
Figura 3.9 - Espaço celular preenchido com o atributo altimetria (altitude).....	54
Figura 3.10 – Fluxo de água no espaço celular onde cada célula pode ter até oito células vizinhas.	56
Figura 4.1 – Arranjo estrutural do BR-MANGUE, onde é evidenciado a lógica de implementação do modelo conceitual em linguagem de programação.	62
Figura 4.2 - Distribuição matemática adotada para a elevação do NMRM.	63
Figura 4.3 - Simulação da área remanescente de manguezal a cada passo de elevação do NMRM adotado no presente estudo.	64
Figura 4.4 - Simulação da área perdida e migrada de manguezal a cada passo de elevação.....	68
Figura 4.5 - Classes de cobertura do solo e a distribuição espacial das áreas de manguezal na Ilhado Maranhão: (A) - Situação inicial com NMRM = 0 m (2012), (B) – Simulação após NMRM de 0,011 m (2013), (C) - Simulação após NMRM de 0,178 m (2027) (D) – Simulação após NMRM de 0,97 m (2100).....	72
Figura 4.6 – Mudanças nas florestas de manguezal presentes na Ilha do Maranhão durante 1993 (A) a 2008 (B).	75
Figura 4.7 – Exemplo de aterro de manguezal na Ilha do Maranhão durante 1975 a 2001.	76

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Principais países em área de ocorrência do ecossistema manguezal.	7
Tabela 2.2 - Estimativas da área de manguezal realizadas para o Brasil	9
Tabela 2.3 - Projeções para a elevação média global do nível do mar para meados do século XXI.....	16
Tabela 2.4 - Características locais que influenciam a exposição do manguezal à elevação do NMRM.	28
Tabela 2.5 - Taxas médias globais e desvio padrão de sequestro de carbono para ecossistemas costeiros vegetados.....	30
Tabela 2.6 - Avaliações econômicas de alguns serviços prestados pelos manguezais à zona costeira.....	31
Tabela 4.1 - Padrões de resistência, declínio e expansão do manguezal em relação aos intervalos de elevação do NMRM simulados.	65
Tabela 4.2 - Valores de expansão de área (migração) e de perdas brutas e líquidas de manguezal por intervalos de eventos de elevação do NMRM.	69

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Pág.

AIM	Área de Influência das Marés
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
INCT	Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
NMRM	Nível Médio Relativo do Mar
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Premissa.....	4
1.2 Objetivo Geral.....	4
1.2.1 Objetivos Específicos	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Ecossistema Manguezal.....	5
2.1.2 Influência dos Componentes das Mudanças Climáticas Sobre o Ecossistema de Manguezal	12
2.2 Elevação do Nível do Mar	15
2.2.1 Elevação do Nível do Mar e a Dinâmica do Ecossistema Manguezal.....	20
2.2.2 Manguezal como Elemento Atenuador dos Impactos das Mudanças Climáticas na Zona Costeira.....	29
2.3 Modelagem Computacional para Estudos da Resposta do Manguezal à Elevação do Nível do Mar	31
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	37
3.1 Modelo Conceitual	38
3.2 O exercício de Modelagem - construção do modelo e simulação	42
3.2.1 Plataforma de Modelagem.....	42
3.3 Área de Estudo: Ilha do Maranhão.....	43
3.4 Estimativa da Área de Influência de Maré (AIM)	48
3.5 Base de dados e organização do espaço celular	50
3.6 Experimento de Modelagem (BR-MANGUE).....	54
Simulação da Elevação do Nível Médio Relativo do Mar (NMRM)	55
3.6.1 Regras de Transição no Modelo BR-MANGUE	57
3.7 Ajuste do experimento de modelagem.....	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
5.1 Recomendações.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
APÊNDICE A - CÓDIGO DO MODELO EM LINGUAGEM LUA	93

APÊNDICE B – RESULTADOS COMPLETOS DO EXPERIMENTO DE MODELAGEM.....	95
ANEXO A - ARTIGOS PUBLICADOS	99

1 INTRODUÇÃO

O Manguezal é um ecossistema de transição entre o mar e o continente, desempenhando papel vital na conservação da biodiversidade biológica e para a proteção contra eventos extremos climáticos na zona costeira (LUGO et al., 2010). Os produtos e serviços prestados pelo manguezal à zona costeira são estimados em valores monetários anuais variando de US\$ 200.000.000 a US\$ 900.000.000 por km² (UNEP-WCMC, 2006).

O processo de aquecimento do sistema climático decorrente das atividades humanas iniciado desde o período pré-industrial é muito provável (IPCC, 2007; 2013). De acordo com o quinto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (AR5-IPCC, 2013), as mudanças climáticas podem ser entendidas como qualquer mudança no clima ocorrida ao longo do tempo devido à variabilidade natural ou decorrente das atividades humanas.

Um efeito característico das mudanças climáticas na zona costeira é o fenômeno de elevação média global do mar. Este processo é irreversível por pelo menos 1.000 anos como resultado da expansão térmica dos oceanos, mesmo que as atuais taxas de emissões de dióxido de carbono (CO₂)¹ fossem cessadas (SOLOMON et al., 2009).

De todos os efeitos das mudanças climáticas, a elevação do nível médio relativo do mar (NMRM) caracteriza-se como o principal fator de vulnerabilidade do manguezal (FIELD, 1995; SCHAEFFER-NOVELLI et al., 2002; ELLISON, 2007). Para a presente pesquisa, o conceito de vulnerabilidade adotado é aquele apresentado por IPCC (2001), a saber: vulnerabilidade é o grau pelo qual um sistema é susceptível ou incapaz de enfrentar efeitos adversos da mudança climática, incluindo a variabilidade e os extremos do clima.

¹ Principal gás de efeito estufa de origem das atividades antrópicas, queima de combustíveis fósseis e das atividades de uso e ocupação do solo (IPCC, 2007; 2013).

As formas de uso e ocupação do solo podem atuar como elemento maximizador dos impactos negativos da elevação do NMRN para o manguezal, pois a ocupação humana tende a inviabilizar a colonização de novas áreas, mesmo quando ocorrem condições propícias à colonização do manguezal, como deslocamento da área de influência das marés, ocorrência de processos de progradação vertical e horizontal de sedimento (MCLEOD; SALM 2006; LOVELOCK; ELLISON 2007, SOARES 2009).

O Brasil é o segundo país em área total de manguezal (SPALDING, KAINUMAAND; COLLINS, 2010) e também detém a maior área contínua de manguezal do mundo que é localizada no litoral da Amazônia legal (KERJVE et al., 2002; WILSON et al., 2013). Assim, entender o padrão de resistência do ecossistema manguezal aos potenciais impactos das mudanças climáticas para articulação de medidas de conservação/preservação e/ou mitigação é um grande desafio. Poucos estudos têm sido direcionados para compreender e simular os padrões de resposta do manguezal às alterações climáticas em território brasileiro. Entre estes pode-se mencionar: Soares (2009) desenvolveu um modelo conceitual que indica os potenciais impactos da elevação do mar em relação às propriedades ecológicas, fisiológicas e processos de florestas de mangues, assim como, também, em termos dos ambientes físicos onde estas ocorrem; e Faraco et al. (2010) que formularam uma metodologia para estimar o grau de vulnerabilidade do manguezal e populações de pescadores aos impactos oriundos das alterações no clima.

A maior parte dos estudos realizados em território brasileiro é relacionada à influência da elevação do nível do mar, mesmo que indiretamente, sobre o ecossistema manguezal são pautados no uso do sensoriamento remoto para acompanhamento da dinâmica de sua área de ocorrência (LARA; COHEN, 2003; SOUZA-FILHO, 2005, LACERDA et al., 2007; BATISTA et al., 2008; WILSON et al., 2013), e estudos de cunho geológico, com uso de marcadores radiométricos para entendimento de ocorrência do manguezal no período pós-glacial no Holoceno (LARA; COHEN, 2009; GUIMARÃES, 2010; FRANÇA et al., 2012). Conduto cabe mencionar que ainda são raros os estudos que objetivam a antecipação dos efeitos da elevação do nível do mar no manguezal (BEZERRA, AMARAL; KAMPEL, 2013).

Além da importância relacionada à área de ocorrência do manguezal e considerando a ainda baixa produção científica brasileira para a temática no que tange uma análise precoce dos possíveis impactos, estudar o manguezal no contexto das implicações climáticas se justifica pela forma secundária que este ecossistema tem sido submetido nos fóruns de mudanças do clima (NELLMAN et al., 2009).

Nas últimas décadas, o manguezal e demais ecossistemas costeiros e marinhos têm sido objeto de estudo no que tange sua elevada capacidade de sequestrar e imobilizar o dióxido de carbono (CO_2) e demais gases de efeito estufa (MURRAY et al., 2010; AGEDI, 2014), processo denominado de *blue carbon* (carbono azul) e como elemento de amenização de eventos climáticos extremos (WALTER et al., 2008; HUSRIN, STRUSINSKA; OUMERACI, 2012).

Estudar e compreender a capacidade de resistência e/ou resiliência do ecossistema manguezal à elevação do nível do mar, sobretudo em áreas antropizadas é imprescindível para posterior proposição de medidas mitigadoras dos impactos negativos das mudanças climáticas na zona costeira brasileira. Os conceitos de resistência e resiliência adotados na presente pesquisa são aqueles mencionados por Alongi (2008): Resistência refere-se à constância de um ecossistema ao longo do tempo, independentemente do grau de perturbação ambiental que possa estar agindo sobre o mesmo. Resiliência é a capacidade que um ecossistema tem de se recuperar das perturbações ambientais em estados de maior ou menor resistência.

O uso de modelagem computacional constitui uma ferramenta útil para entendimento antecipado do padrão de resposta do manguezal à elevação do nível do mar em escala local e regional. Os experimentos de modelagem podem ser entendidos como um laboratório virtual, onde é possível simular os potenciais impactos, antes que os mesmos se manifestem. Isto se torna significativamente útil principalmente em áreas de difícil acesso e/ou com pouca produção científica e/ou de dados (BERGER et al., 2008). A presente pesquisa é direcionada para apresentação de uma proposta metodológica, tendo-se como base, a ferramenta de modelagem, para análise do padrão de respostas do manguezal a eventuais cenários de elevação do mar.

A questão científica do presente estudo, pauta-se no seguinte questionamento: qual é a capacidade de resistência do ecossistema manguezal à elevação do nível do mar? Ou seja, até que ponto o manguezal pode ser exposto e assimilar uma determinada taxa de elevação do NMRM sem sofrer alterações significativas?

1.1 Premissa

O uso da ferramenta de modelagem pode propiciar um melhor entendimento do padrão de resistência do manguezal à elevação do NMRM, se observadas às especificidades geográficas em escala local ou regional da área ocupada pelo referido ecossistema. Podendo favorecer assim, a identificação de áreas de manguezal com diferentes níveis de vulnerabilidade a potenciais eventos de elevação do mar.

1.2 Objetivo Geral

Simular o padrão de resposta e determinar a capacidade de resistência do ecossistema manguezal à elevação do nível do mar.

1.2.1 Objetivos Específicos

- (1) Elaborar um modelo conceitual que possa sistematizar padrões de resposta do manguezal à elevação do nível do mar;
- (2) Traduzir o modelo conceitual em linguagem computacional de modo a permitir o exercício de simulação;
- (3) Identificar eventuais padrões de resistência ou declínio do manguezal a determinados intervalos de elevação do nível do mar;
- (4) Simular processos de alteração na área de manguezal (área total, área remanescente, área perdida e área migrada a diferentes eventos de elevação do nível do mar).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ecossistema Manguezal

O manguezal é um ecossistema de transição entre os ambientes terrestre e marinho que se desenvolve nas regiões tropicais e subtropicais do mundo entre as latitudes de 30° N e 30° S (GIRI et al., 2011). Preferencialmente, o manguezal ocorre em locais com as seguintes características climáticas e ambientais: (a) temperatura média do mês mais frio superior a 20° C e amplitude termal anual inferior a 5° C; (b) substrato aluvial (lamoso); (c) precipitação pluvial acima de 1.500 mm/ano, sem longos períodos de secas; (d) grande amplitude de maré (WALSH, 1974), ver Figura 2.1.

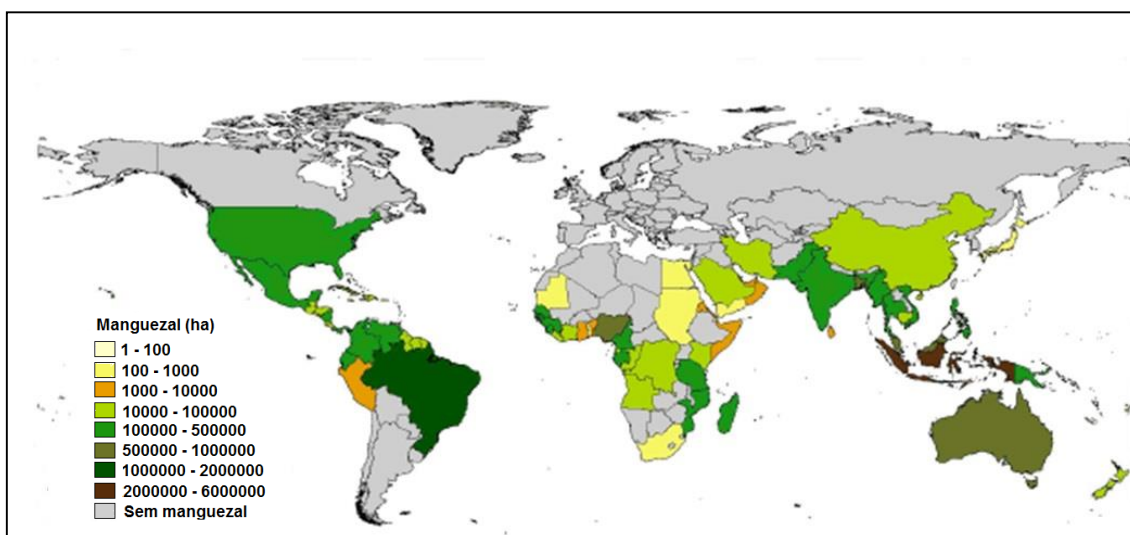


Figura 2.1 - Distribuição geográfica global das áreas de manguezal (ha) por país.

Fonte: FAO (2003).

Os bosques de mangues são caracterizados por espécies vegetais lenhosas típicas que possuem adaptações para a sustentação em substrato inconsolidado e para a ação das marés, garantindo a aeração dos sistemas radiculares, a tolerância à salinidade e às condições de anoxia do sedimento (ESPINOSA e FLORES, 2011). A flora de mangue é composta por cerca de 73 espécies, incluindo espécies típicas e espécies associadas (SPALDING, KAINUMA AND COLLINS, 2010), muitas das quais apresentam estruturas adaptadas para sobreviver sob ação das marés, como: pneumatóforos, lenticelas, raízes escoras (caules modificados), glândulas para excreção de sal, dentre outras.

Estas estruturas garantem a sustentação ao substrato inconsolidado, respiração aérea das raízes e excreção de sal.

As especificidades dos mecanismos adaptativos dependem de cada espécie vegetal (ESPINOSA; FLORES, 2011). O gênero *Rhizophora*, por exemplo, apresenta caules modificados para a sustentação, os Rizóforos que servem para auxiliar a sustentação da planta no sedimento inconsolidado (lama), além de possuir pequenos orifícios (as lenticelas) que garantem as trocas gasosas. Já o gênero *Avicennia* possui um conjunto de raízes que se distribuem de forma radial para garantir a sustentação e um segundo conjunto de raízes que possuem geotropismo negativo (os pneumatóforos) garantindo a “respiração” aérea da raiz (trocas gasosas), além de possuir a capacidade de expelir o sal através de suas folhas (Figura 2.2).

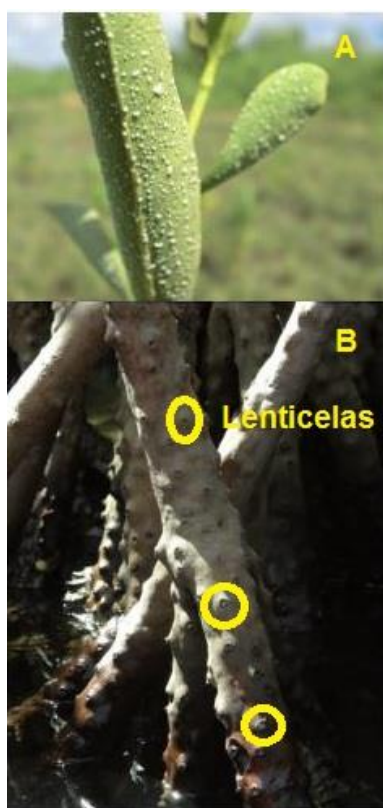


Figura 2.2 - Mecanismos adaptativos do manguezal para sua ocorrência na área de influência das marés. (A) – Excreção de sal pelas folhas no gênero *Avicennia*. Lenticelas que proporcionam a respiração aérea em Rizóforos presentes no gênero *Rhizophora*.
Fonte: Spalding, Kainumaand e Collins (2010)

Quanto à fauna do manguezal, estima-se aproximadamente que existam 1.300 espécies típicas (FATOYINBO et al., 2008), entre organismos invertebrados, como moluscos, anelídeos, crustáceos, equinodermos, dentre outros, e vertebrados, como peixes, anfíbios, répteis, aves e mamíferos.

Globalmente, o ecossistema manguezal ocupa uma área de aproximadamente 152.361 km², em 123 países, sendo a maior área presente na Indonésia (31.894 km²). O Brasil é o segundo país quanto à área total de manguezal, com 13.000 km² (Tabela 2.1), o que corresponde a aproximadamente 8,5% do total mundial (SPALDING, KAINUMAAND e COLLINS, 2010). A maior área continua de manguezal do planeta, com cerca de 7.423,60 km² (WILSON et al., 2013), encontra-se no litoral amazônico brasileiro (KERJVE et al., 2002; WILSON et al., 2013).

Tabela 2.1 - Principais países em área de ocorrência do ecossistema manguezal.

País	Área de manguezal (km ²)	Proporção do total global (%)
Indonésia	31.894	20,9
Brasil	13.000	8,5
Austrália	9.910	6,5
México	7.701	5,0
Nigéria	7.356	4,8
Malásia	7.097	4,7
Mianmar	5.029	3,3
Bangladesh	4.951	3,2
Cuba	4.944	3,2
Índia	4.326	2,8
Papua Nova Guiné	4.265	2,8
Colômbia	4.079	2,7

Fonte: Spalding, Kainumaand e Collins (2010)

Analizando apenas áreas de manguezal de macromaré do nordeste do Pará e noroeste do Maranhão, a denominada Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia – CMMA, Souza-Filho (2005) atribui aos estados do Maranhão e Pará, a área continua mais extensa de manguezal do planeta com 7.591,09 km², o que corresponde a 46,6% dos manguezais brasileiros (Figura 2.3).

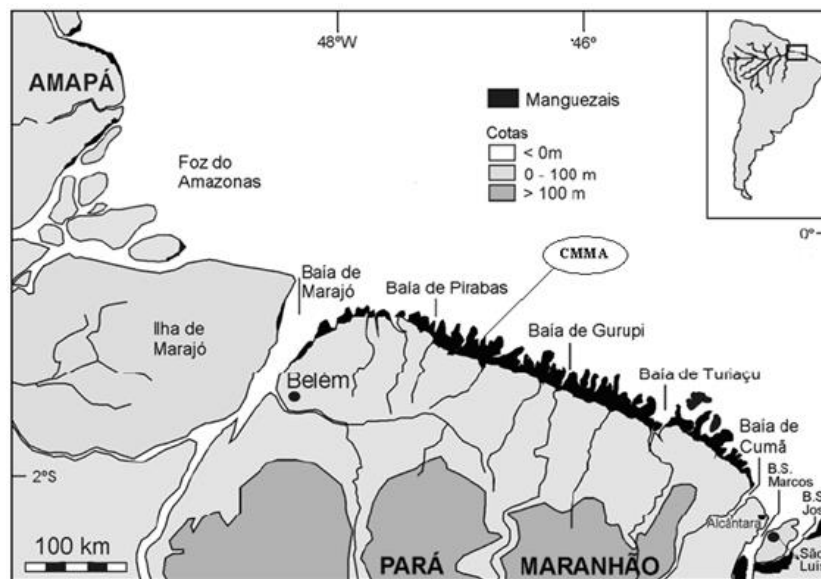


Figura 2.3 - Mapa de localização da Costa de Macromaré de Manguezais da Amazônia (CMMA).

Fonte: Adaptado de Souza-Filho (2005)

Diferentes estudos com o uso de técnicas de sensoriamento remoto para o mapeamento do manguezal destacam a área de ocorrência para o ecossistema manguezal no Brasil (Tabela 2.2). Ainda que fundamentados em metodologias distintas, as estimativas corroboram a expressiva contribuição brasileira em área de manguezal.

Tabela 2.2 - Estimativas da área de manguezal realizadas para o Brasil

Ano	Área (ha)	Fonte
1973	3.600.000	FAO, UNEP (1981)
1980	2.500.000	FAO, UNEP (1981)
1987	1.376.255	Kjerfve, B e Lacerda L.D., (1993).
1991	1.340.000	Spalding, M.D., Blasco, F. e Field, C.D. (1997)
1991	1.012.376	Hertz, R. (1991)
1995	1.637.132	WCMC (1995)
2000	1.015.000	Aizpuru, M., Achard, F. e Blasco, F. (2000)
2000	962.683	Giri et al. (2011)
2003	1.300.000	Spalding, Kainumaand e Collins (2010)
1980	1.050.000	FAO (2007)
1990	1.015.000	
2000	1.000.000	
2005	1.000.000	
2009	1.225.444	MMA (2009)

Os manguezais proporcionam diferentes bens e serviços ecológicos como benefícios para a zona costeira (RÖNNBÄCK, 1999). A presença física dos mangues promove a contenção de sedimentos, o que garante a qualidade das águas e amortece os impactos de inundações e maremotos (ALONGI, 2008). Manguezais sequestram carbono (CHMURA et al., 2003; DUARTE, MIDDELBURG e CARACO, 2005; BRIDGHAM et al., 2006; LAFFOLEY e

GRIMSDITCH, 2009; NELLMANN et al., 2009) exercendo função relevante para amenizar os efeitos dos gases de efeito estufa de origem antrópica. Estima-se que os bens e serviços ambientais prestados pelo manguezal à zona costeira variam de US\$ 200.000 a US\$ 900.000 por km², em valores monetários anuais (UNEP-WCMC, 2006).

A existência de interações entre diversos segmentos da sociedade com os bosques de mangues confere a relevância social do manguezal, como descrito por Rebelo-Mochel (2003): os diferentes grupos sociais pertencentes ao litoral norte do país interagem com o ambiente de manguezal através da culinária, manifestações culturais e atividades de lazer. Na zona costeira maranhense na região do delta do rio Parnaíba, por exemplo, cerca de 4.000 famílias dependem direta ou indiretamente da "cata de caranguejo" *Ucides cordatus* (caranguejo Uçá).

As relações entre comunidades tradicionais e o manguezal contribuem para a manutenção da diversidade social característica das comunidades situadas ao longo da costa norte do Brasil, como grupos indígenas, remanescentes de antigos quilombos, comunidades pesqueiras e agrícolas, além dos núcleos urbanos adjacentes. A Figura 2.4 exemplifica algumas interações entre comunidades tradicionais com os ambientes de mangues ao redor do mundo. Na Figura 2.4, (A) Pescadores nas Filipinas constroem suas casas adjacentes aos manguezais para pesca e proteção contra tempestades. (B) Casas construídas em bosque de mangue no Balapitiya, Sri Lanka:. (C) Madeira de mangue no Quênia destinada a mercados e lojas. (D) Mangues em Mankote, Santa Lúcia cortados para produzir carvão. (E) Ribeirinhos coletam mariscos no manguezal nas Filipinas. (F) Técnicas de pesca (rede) para a captura em águas escuras e salobras do mangue em Mankote, Santa Lúcia. (G) Casca de *Cerriops decandra* para tingir redes de pesca na Índia.

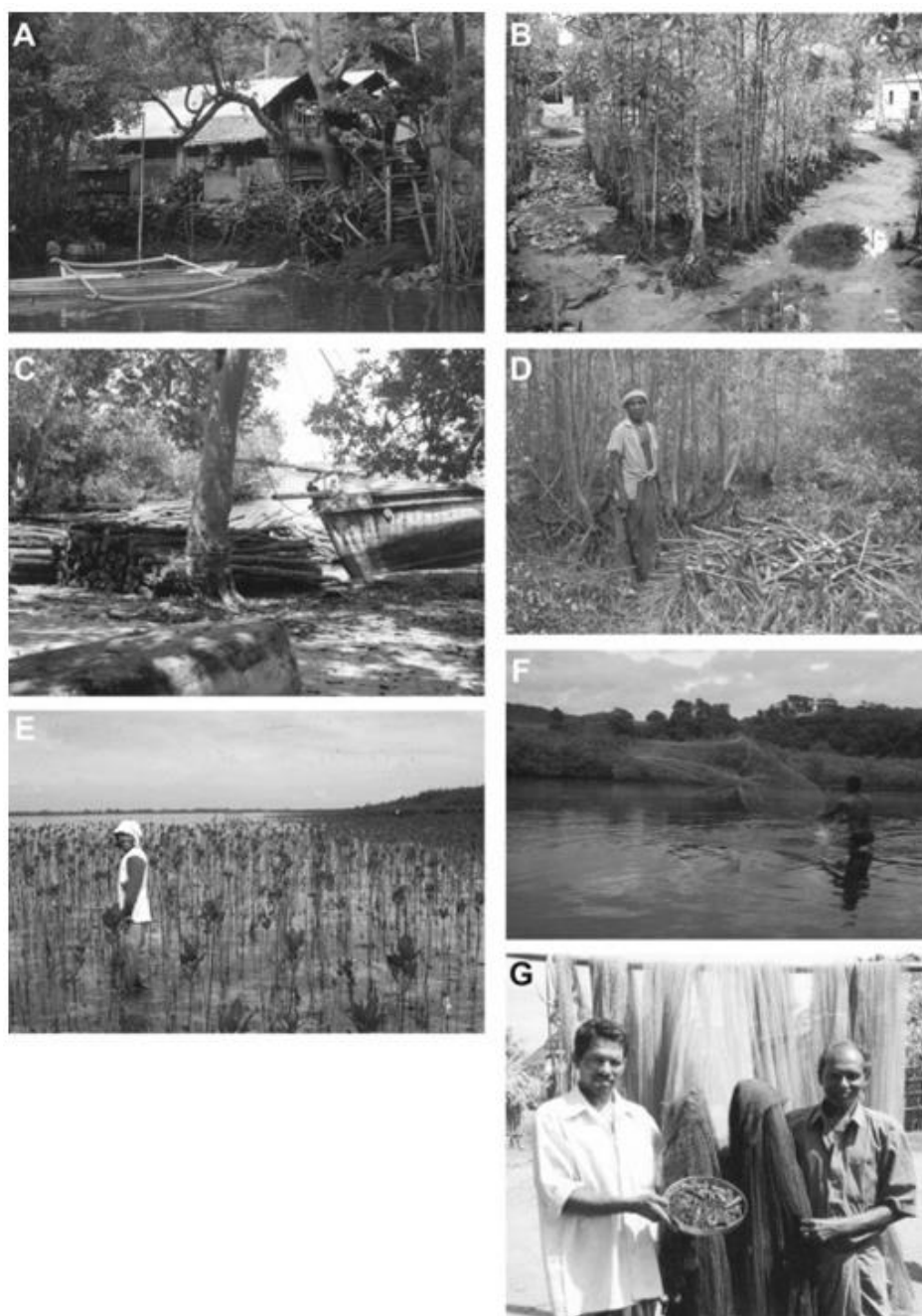


Figura 2.4 - Exemplos de interações entre populações tradicionais com ambientes de manguezais.
 Fonte: WALTERS et al. (2008).

2.1.2 Influência dos Componentes das Mudanças Climáticas Sobre o Ecossistema de Manguezal

Os componentes das mudanças climáticas que podem ocasionar impactos negativos e positivos nos bosques de mangues são, por exemplo, alterações nas taxas de temperatura, nas concentrações de dióxido de carbono atmosférico (CO₂), no padrão de ocorrência de furações, nas taxas de intensidade e distribuição de precipitação pluviométrica, no processo de elevação do nível do mar, dentre outros. Alterações climáticas também podem induzir alterações na hidrologia continental, e estas, por sua vez podem proporcionar impactos no manguezal ao ocasionar maior ou menor inserção de água doce e nutrientes no estuário (GILMAN et al., 2008).

Os mangues apresenta um máximo de desenvolvimento quando a temperatura média do ar encontra-se no patamar de 25 °C e intensa redução foliar em temperaturas inferiores a 15°C (HUTCHINGS; SAENGER, 1987). Em temperaturas acima de 25°C normalmente há redução do processo de produção de folhas em algumas espécies. Temperaturas a partir de 35°C tendem a acarretar estresse térmico e por consequência, há prejuízo no desenvolvimento das raízes e dos propágulos (UNESCO, 1992). Quando a temperatura da folha apresenta variação entre 38 a 40°C, o processo fotossintético praticamente é anulado em muitas espécies de angiospermas típicas dos bosques de mangues (CLOUGH, ANDREWS; COWAN, 1982; ANDREWS, CLOUGH; MULLER, 1984).

De acordo com os estudos de Ellison (1993), Field (1995) e Gilman et al. (2008), o aumento da temperatura média do ar pode induzir os seguintes impactos no ecossistema de manguezal: (i) processo de sucessão ecológica das espécies induzido, (ii) alterações nos padrões fenológicos (iii) incremento da produtividade quando o aumento da temperatura não ultrapassar certos limites e (iv) expansão de áreas de manguezal para latitudes maiores (acima de 25° N e S), onde normalmente o manguezal teria sua colonização prejudicada por temperaturas mínimas e pela ação das geadas.

Alterações nas taxas de CO₂ na atmosfera podem afetar os bosques de mangues de forma direta e indireta. O impacto direto pode ocorrer através da maximização do processo fotossintético e consequentemente, incremento das taxas de crescimento da biomassa (UNEP, 1994; MCLEOD; SALM, 2006). O aumento de CO₂ nos oceanos pode modificar o pH da coluna d'água do mar, o que levaria à morte dos corais pelo fenômeno de embranquecimento. Esse processo pode proporcionar impactos indiretos ao manguezal, pois em certos locais os recifes de corais funcionam como barreiras que atenuam a ação das ondas que se direcionadas diretamente aos bosques de mangues, aumentaria a ação erosiva comprometendo o manguezal (MCLEOD; SALM, 2006).

Alterações no padrão de ocorrência de furacões decorrente de mudanças climáticas também podem impactar o manguezal. Thomas et al. (2009) ressaltam que os impactos imediatos dos furacões são bem documentados, tais como mortandade de espécies, abertura de clareiras e alteração nas taxas de sedimentação. Contudo, os efeitos dos impactos a longo prazo ainda não foram compreendidos de forma conclusiva pela comunidade científica. Doyle e Girod (1996) indicaram que a ocorrência de furacões pode ter sido o principal fator de controle da dinâmica dos manguezais no sul da Flórida (EUA) durante o século XX. A Figura 2.5 apresenta um exemplo de manguezal impactado pela ação de um ciclone tropical no Vietnã.



Figura 2.5 - Manguezais destruídos pela ação de ciclones no Vietnã em janeiro de 2010.

Fonte: Keunzer et al. (2011)

Diminuição de taxas de precipitação acarretam perdas de produtividade, de crescimento e desfavorecimento da sobrevivência de plântulas de manguezal (MCLEOD; SALM, 2006). Estudos realizados em mangues neotropicais indicam que as espécies *Rhizophora mangle* e *Laguncularia racemosa* têm limitada tolerância a altos teores de salinidade quando comparadas à espécie *Avicennia germinans*. Esta tolerância à salinidade explica em parte o fato de bosques constituídos de *Avicennia germinans* serem dominantes em mangues neotropicais, onde a evaporação excede a precipitação e a salinidade do solo é maior que 120 g Kg^{-1} (CINTRÓN, LUGO; POOL, 1978). Alterações nas taxas de precipitação e a consequente variação de salinidade podem ocasionar processos de sucessão na composição dos bosques de mangues, onde as espécies mais tolerantes ao sal teriam maior vantagem (ELLISON, 1993).

A elevação do nível do mar proporciona impactos no manguezal decorrentes de alterações no aumento da profundidade local da coluna d'água, no hidroperíodo das marés, nos padrões de circulação e também através de mudanças abruptas em taxas de acreção e erosão do sedimento (CAHOON et al., 2006; ALONGI, 2008; MCLVOR et al., 2013). McLeod e Salm (2006)

indicam que áreas de manguezal mais vulneráveis ao fenômeno de elevação do nível do mar são aquelas localizadas em: (i) ilhas de relevo baixo, (ii) locais com pouca influência de rios, (iii) locais ricos em carbonatos, (iv) áreas rebaixadas devido a movimentos tectônicos, intensa utilização do lençol freático e elevada atividade de mineração e (v) locais adjacentes a áreas altamente urbanizadas ou cuja topografia seja bem acidentada.

A incorporação de água através do lençol freático resultante do efeito das mudanças climáticas sobre a hidrologia local proporciona a dilatação do sedimento do manguezal (GILMAN et al., 2008). Como consequência, a elevação do nível do sedimento pode promover condições de competição favorável ou desfavorável aos bosques de mangues, dependendo do sistema radicular de cada espécie presente. Por exemplo, a espécie *Rhizophora mangle* que possui dois sistemas de sustentação com raízes e caules modificados, pode ter vantagem em termos de colonização em sedimentos inconsolidados (lama) e dilatados por influência da água subterrânea.

2.2 Elevação do Nível do Mar

Os últimos relatórios do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) indicam que os sistemas terrestres têm evidenciado sinais das alterações no clima, sendo elencados no quarto relatório de avaliação (IPCC, 2007): (i) a taxa média global do nível do mar subiu 1,8 mm entre 1961 e 2003; (ii) observações desde 1961 indicam aumento da temperatura média do oceano em profundidades de até 3.000 m; (iii) o oceano tem absorvido mais de 80% do calor acrescentado ao sistema climático. Solomon et al. (2009) indicam que a gravidade das mudanças climáticas induzidas pelas emissões de dióxido de carbono provenientes das atividades antrópicas é irreversível por pelo menos 1.000 anos, ainda que as taxas atuais de emissões cessem. A diminuição de CO₂ na atmosfera diminui o forçamento radiativo². Contudo, tal

² O forçamento radiativo é uma medida da influência de um fator na alteração do equilíbrio da energia que entra e sai do sistema Terra-atmosfera. É um índice da importância do fator como possível mecanismo de mudança do clima. O forçamento positivo tende a aquecer a superfície, enquanto o forçamento negativo tende a esfriá-la (IPCC, 2007).

processo é compensado pelo processo lento de expansão térmica dos oceanos.

A elevação média global do mar durante o século XX variou de 0,12 m a 0,22 m (IPCC, 2007). Outras projeções indicam que a elevação média global pode oscilar de 0,26 m a 0,59 m até a última década do século XXI (SOLOMON et al., 2007). Mensurações mais recentes do IPCC indicam que entre o período de 1901 a 2010, a elevação média global pode ter variado de 0,17 a 0,21 m (IPCC, 2013).

O quinto relatório de avaliação do IPCC-AR5, considerando observações realizadas entre 1986 e 2005, indica que para o cenário mais alarmante (RCP8.5), a taxa de elevação média global do mar pode chegar a 0,97 m até as duas últimas décadas do século XXI (IPCC, 2013, p. 17). A Tabela 2.3 apresenta outras projeções para a elevação média global do mar presentes no IPCC-AR5.

Tabela 2.3 - Projeções para a elevação média global do nível do mar para meados do século XXI.

Elevação média global do nível do mar	Cenários AR5	2046-2065		2081-2100	
	RCP2.6	Média (m)	Variação provável (m)	Média (m)	Variação provável (m)
	RCP2.6	0,24	0,17 a 0,31	0,40	0,26 a 0,54
	RCP4.0	0,26	0,19 a 0,33	0,47	0,32 a 0,62
	RCP6.0	0,25	0,18 a 0,32	0,47	0,33 a 0,62
	RCP8.5	0,29	0,22 a 0,37	0,62	0,45 a 0,81

Fonte: Adaptado de IPCC (2013, p. 75)

No cenário brasileiro, e de acordo com o primeiro relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), o nível do mar está aumentando e variações de 20 a 30 cm são esperadas até o final do século XXI, em algumas localidades até meados do século ou até antes disso.

Na costa brasileira ainda são poucos os estudos realizados com base em observações *in situ* sobre eventos de elevação do nível do mar (PBMC, 2012). Segundo o grupo de trabalho do INCT-Zonas Costeiras, o principal desafio para a previsão da elevação do nível do mar sobre a zona costeira brasileira reside em dois aspectos básicos: a inexistência de um referencial altimétrico ortométrico para a zona costeira e a carência de dados históricos de nível do mar que permitam estabelecer taxas de elevação. Ainda assim, o PBMC indica que taxas de aumento do nível do mar já vêm sendo reportadas pela comunidade científica brasileira desde o final dos anos 1980 e início dos anos 1990. Segundo o PBMC as estimativas encontradas na literatura para o Brasil são:

- Recife (1946-1987): 5,4 cm/déc (cm por década);
- Belém (1948-1987): 3,5 cm/déc;
- Cananéia-SP (1954-1990): 4,0 cm/déc;
- Santos-SP (1944-1989): 1,1 cm/déc.

Nobre (2011) indica que aproximadamente 50% de todo o litoral brasileiro é vulnerável à elevação do nível do mar e toda a costa brasileira sofre com a erosão, com exceção das áreas adjacentes aos deltas dos grandes rios, o que evidencia um grande desafio: o litoral brasileiro possui uma extensão de 8.698 km e 514.000 km² de área, sendo composto por aproximadamente 300 municípios costeiros (NICLODI e PETERMANN, 2010), em 17 Unidades da Federação (Figura 2.6).

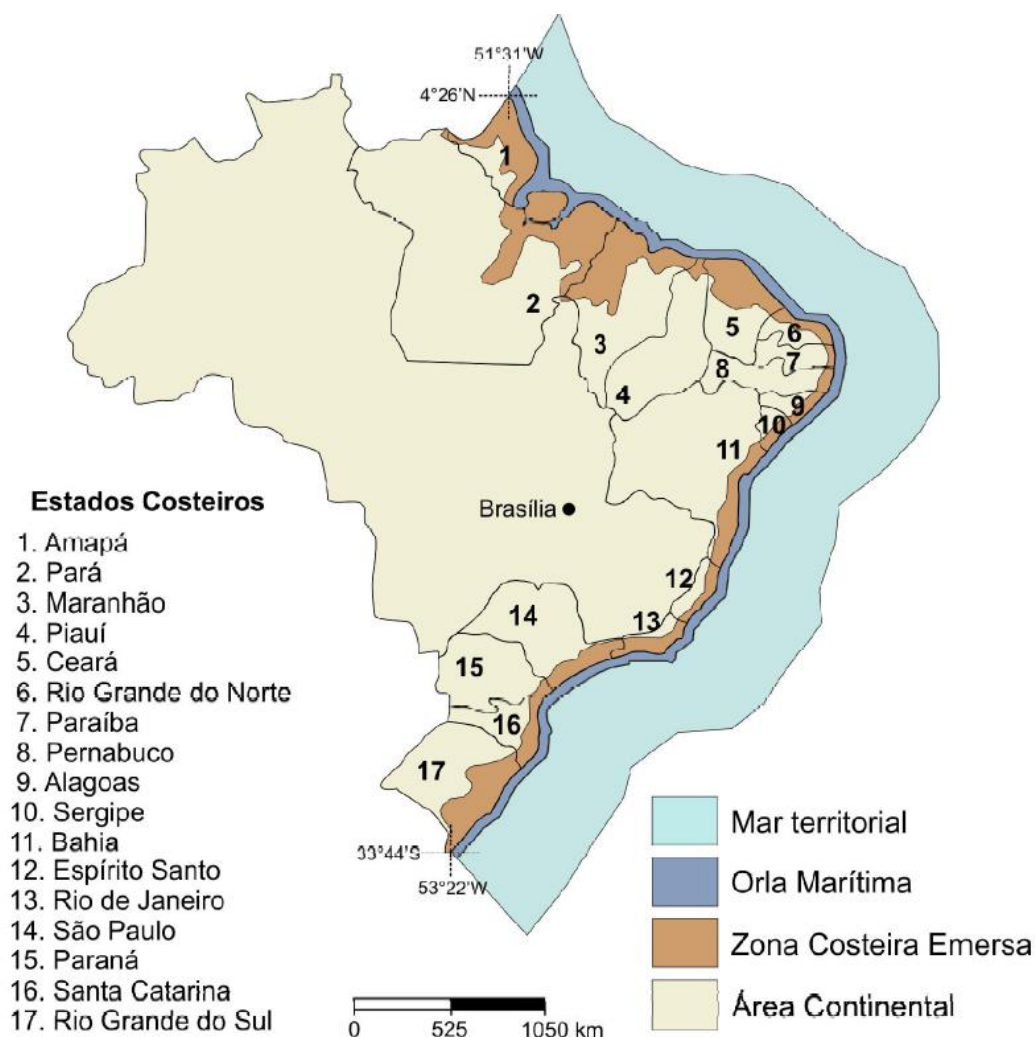


Figura 2.6 -. Zona costeira brasileira.
Fonte: Souza (2009).

A zona costeira brasileira, também conhecida como a “Amazônia azul” compreende toda a região emersa costeira, a orla marítima e o mar territorial; trata-se de uma região com muitas riquezas em termos de diversidade biológica, recursos minerais, recursos culturais e recursos pesqueiros, além do expressivo potencial turístico e portuário. Sendo apontada em alguns estudos como podendo ter uma riqueza maior que própria a “Amazônia verde” (VITAL, SILVEIRA; AMARO, 2005).

Mais de 40% da população brasileira está localizada na zona costeira (SOUSA, 2004) que apresenta intensa atividade portuária, turismo, indústria, pesca e demais pressões antrópicas ligadas às formas de uso do solo. Os grandes centros urbanos são os mais sensíveis a possíveis eventos de elevação do

NMRM, particularmente a região metropolitana do Recife, onde 40 a 80% das construções encontram-se a menos de 30 m da linha da costa, e que por isso, podem ser atingidas (NOBRE, 2011).

Os ecossistemas costeiros também são vulneráveis ao avanço do mar, e nas pesquisas brasileiras, a dinâmica dos ecossistemas costeiros à elevação do mar é acompanhada basicamente com o uso de sensoriamento remoto e observações *in loco* (COPERTINO et al., 2010). Os impactos da elevação do nível do mar na zona costeira brasileira podem se manifestar de forma diferenciada em cada parte do litoral, devido às diferenças regionais na dinâmica costeira, como na amplitude de marés, presença de grandes estuários, dentre outras. Muehe (2010) subdividiu o litoral brasileiro em seis compartimentos de acordo com características da dinâmica costeira (Figura 2.7).

O Compartimento I: É caracterizado pela presença de grandes e profundos estuários, domínio de manguezais e grandes amplitudes de marés que em alguns locais podem chegar a 10 m. Compartimento II: Presença de falésias sedimentares oriundas do Grupo Barreiras e grandes campos de dunas. Pode ser subdividido tendo-se por base o déficit hídrico da região semiárida. Compartimento III: Também há presença de falésias sedimentares oriundas do Grupo Barreiras, porém com menos intensidade. Também possui praias bem desenvolvidas. Compartimento IV: Caracteriza-se por ter grande exposição a ondas de tempestade do Sul e também pelo equilíbrio dos transportes de sedimentos ao longo do ano, quando ondas de alta energia são menos frequentes. Compartimento V: É caracterizado pela proximidade com a Serra do Mar. Compartimento VI: Localiza-se entre o Brasil e o Paraguai, sendo caracterizado pela presença de praias com sedimentos finos e por sistemas lagunares.

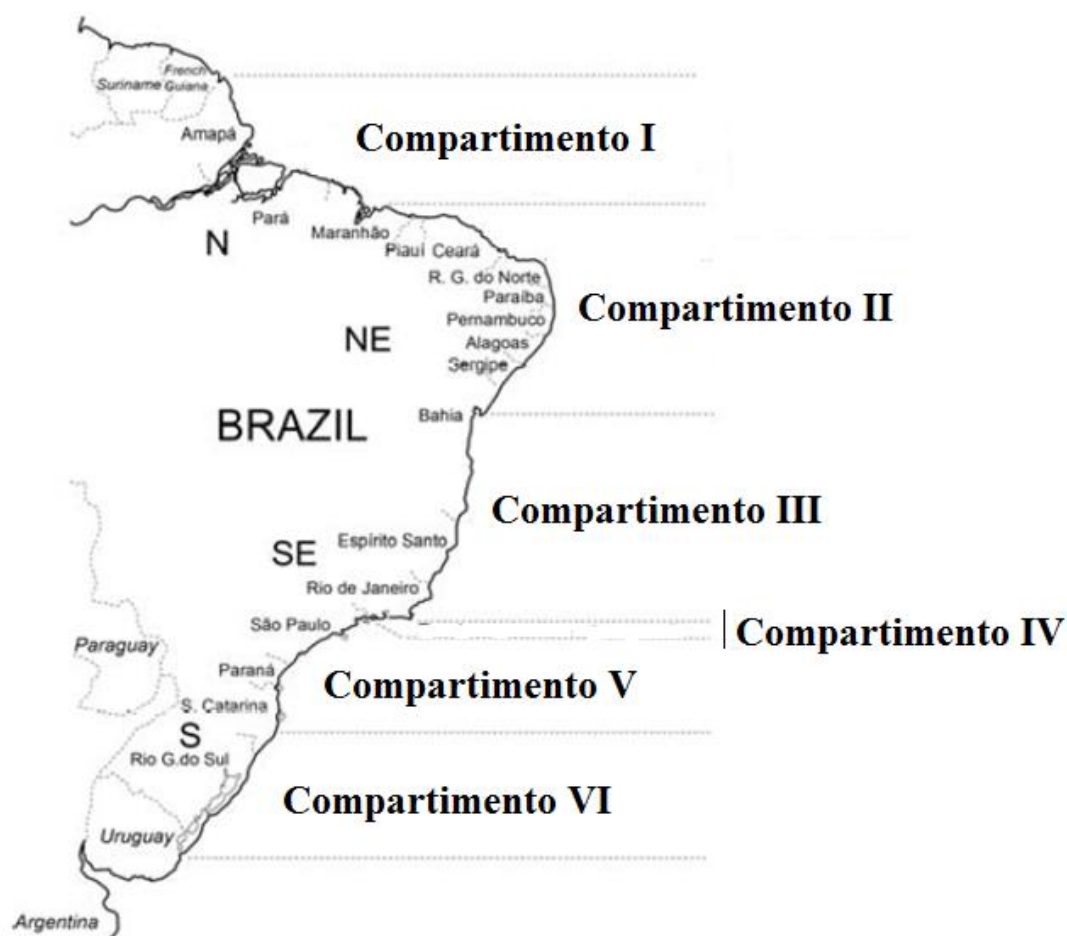


Figura 2.7 - Compartimento da costa brasileira.
Fonte: Adaptado de Muehe (2010).

2.2.1 Elevação do Nível do Mar e a Dinâmica do Ecossistema Manguezal

Os impactos das mudanças climáticas que afetam o manguezal incluem elevação do nível do mar (CAHOON et al., 2006; GIRI et al., 2011), alterações na temperatura (GILMAN et al., 2008), na ocorrência de furacões (DOYLE et al., 2003; 2009), na incidência de precipitação (WHELAN et al., 2005; MCLEOD; SALM, 2006), nas taxas de concentrações de CO₂ (MCLEOD e SALM, 2006; GILMAN et al.; 2008), alterações no padrão de circulação oceânica (GILMAN et al., 2008; SOARES, 2009) e até as respostas humanas às alterações no clima (GILMAN et al., 2008).

O manguezal é particularmente vulnerável ao processo de elevação do nível do mar (FIELD, 1995; LOVELOCK; ELLISON, 2007), por sua localização em áreas de influência das marés³, apresentando, contudo, resistência e resiliência a este processo (ALONGI, 2008), principalmente em locais submetidos à elevada variação de maré e que não possuam baixo relevo (MCLEOD e SALM, 2006). As respostas do manguezal diferem também em consequência de características locais e regionais, tais como: padrões locais nas taxas da elevação do nível do mar e nos processos de sedimentação/erosão (ALONGI, 2008; GILMAN et al., 2008), assim como, amplitude da maré local, topografia do relevo e das formas de uso e ocupação do solo adjacentes (MCLEOD; SALM, 2006).

Gilman, Ellison e Coleman (2007) indicam três cenários gerais que definem o padrão de resposta do manguezal quanto às alterações no NMRM: (i) cenário de não elevação, (ii) retração do NMRM e (iii) elevação do NMRM; tendo-se em consideração uma escala local para períodos de tempo de décadas ou mais (Figura 2.8).

No cenário de não elevação, quando não há aumento do nível do mar em relação à superfície de ocorrência do manguezal (Figura 2.8a), não há alterações significativas na estrutura ecossistêmica local do manguezal (alteração na área, por exemplo). A ocorrência e distribuição das espécies de angiospermas características do manguezal são condicionadas pelo processo de zonação pré-existente no local.

No caso em que ocorre retração do NMRM em relação à superfície de ocorrência do manguezal (Figura 2.8b), há a possibilidade de o manguezal ocupar áreas que estavam submersas, e dependendo da topografia, expandir lateralmente ou em direção ao próprio canal do rio, em situações onde a taxa de sedimentação for maior que a taxa de elevação do mar no local (MCLVOR et al., 2013);

³ A área de influência das marés corresponde à área que se inicia com o valor da maré baixa e vai até o ponto de maré alta (Mclvor et al., 2013), também conhecida como região de estirâncio.

Quando ocorre aumento do NMRM em relação à superfície de ocupação do manguezal (Figura 2.8c), ocorre à inundação permanente e erosão de áreas ocupadas pelo manguezal e o deslocamento da área de influência das marés (AIM), ocasionando perdas de diversidade biológica em decorrência de alterações no hidroperíodo e na zonação pré-existente das espécies vegetais do manguezal. Caso não existam barreiras à sua colonização como, por exemplo, construções antrópicas, o manguezal poderá migrar em direção ao continente. Outra possibilidade é de o manguezal resistir ao aumento do NMRM em situações onde ocorra intensa acreção vertical e acreção longitudinal de sedimento, e que estas excedam as taxas de elevação da coluna d'água (MCLVOR et al., 2013).

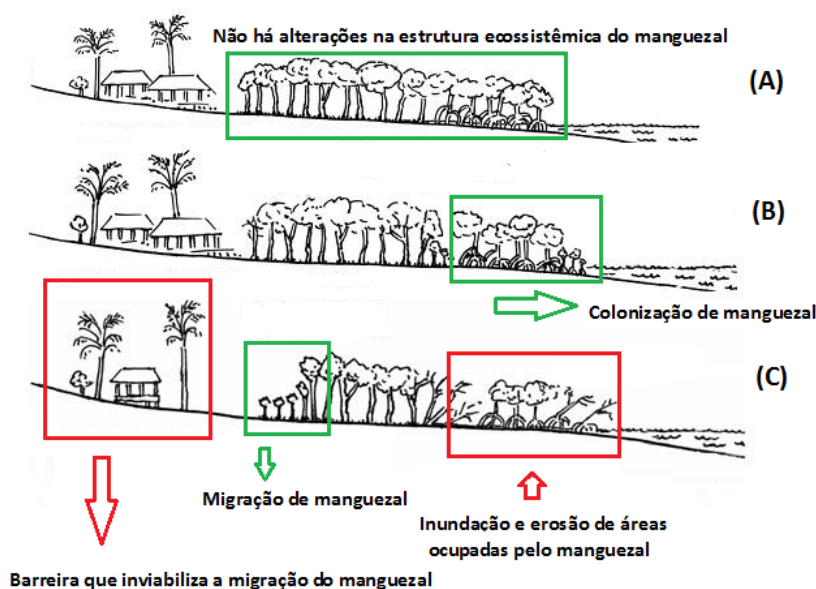


Figura 2.8. Cenários para o padrão geral de resposta do manguezal a alterações no NMRM: (A) – Cenário de não elevação; (B) – Cenário de retração e (C) – Cenário de elevação.

Fonte: Adaptado de Gilman, Ellison e Coleman (2007).

Para o cenário de elevação do NMRM, foco deste trabalho, a elevação do nível do mar pode proporcionar impactos ao manguezal através de alterações no aumento da coluna d'água, alterações no hidroperíodo das marés, nos padrões de circulação e dinâmica da circulação de massas d'água dos oceanos e também, através de mudanças abruptas em taxas de acreção e erosão marinha (CAHOON et al., 2006; ALONGI, 2008).

A distribuição das espécies de angiospermas típicas de manguezal responde ao gradiente de marés, do ponto de menor valor (baixa-mar) até o patamar das maiores marés (preamar), processo denominado de zonação (SCHAEFFER-NOVELLI et al., 2004). Quando houver aumento do NMRM, normalmente ocorre o deslocamento da AIM, e assim, possíveis mudanças no nível do mar alterariam a zonação e conseqüentemente, a diversidade biológica das espécies vegetais do manguezal.

A Figura 2.9 apresenta um modelo conceitual de zonação de manguezal com quatro zonas distintas para as três principais espécies de mangues brasileiros, tendo por base a atividade das marés e a declividade do terreno definindo a posição de cada espécie no gradiente do relevo. Segue breve descrição do processo de zonação da referida figura: Zona I – Região que sofre inundação frequente de marés, com sedimento areno-lodoso e com grande quantidade de matéria orgânica, normalmente com predominância de mangue-vermelho (*Rhizophora* sp). Zona II – Região influenciada por marés intermediárias, frequentemente dominada pelas espécies de mangue-preto (*Avicennia* sp) e mangue-branco (*Laguncularia racemosa*) com sedimento mais arenoso. Zona III – Também denominada de zona de apicum atingida somente em marés com grande amplitude, com sedimento arenoso e normalmente hipersalino o que dificulta a colonização de angiospermas, mas podendo ser colonizada por espécies típicas dos marismas (ex: *Spartina* sp). Zona IV – Zona de transição entre o manguezal e o ambiente terrestre, com a salinidade tendendo a nulidade, caracterizando-se por apresentar um terreno mais alto que não sofre influência das marés, com sedimento arenoso e flora podendo ser composta pela samambaia do mangue (*Acrosticum* sp).

Alterações previstas para o nível do mar podem prejudicar ou beneficiar a composição das diferentes espécies de mangues e conseqüentemente, comprometer os bens e serviços prestados pelo ecossistema (AGRAWALA et al., 2003).

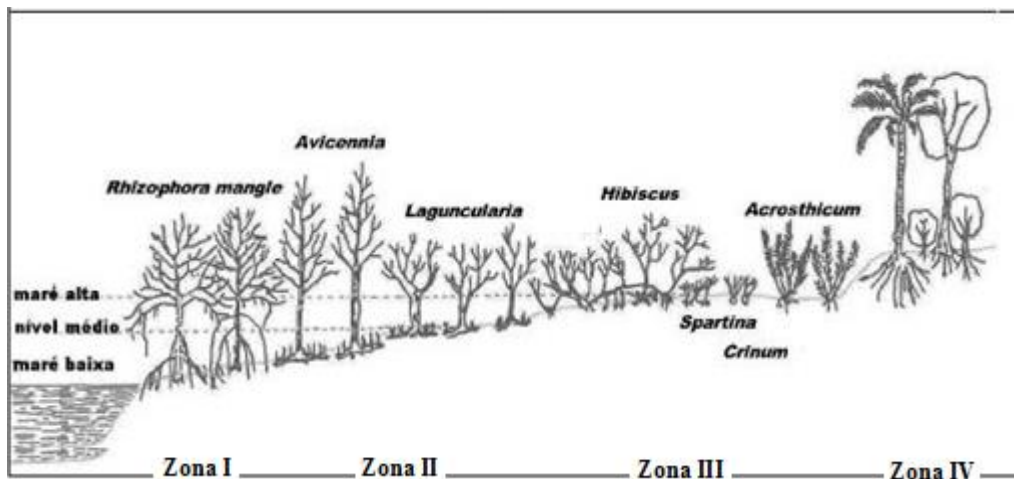


Figura 2.9 - Um exemplo de zonas de colonização do manguezal conforme distribuição da maré e declividade do terreno.

Fonte: Adaptado de Schaeffer-Novell et al. (2004)

Ao modificar o padrão das marés, alterações do nível do mar alteram o processo de sedimentação, principalmente de sedimentos finos que são transportados em suspensão na coluna d'água. Este padrão alterado tende a favorecer processos de acreção de sedimentos em uma área denominada de espaço de acomodação. Esta área descreve o espaço disponível para a expansão do solo, tanto vertical (acreção) quanto lateralmente (acreção longitudinal), dada a posição atual da superfície do solo em um determinado momento, a ação das marés e as forças erosivas (MCLOVR et al., 2013).

Nos casos em que os processos de acreção de sedimento são favorecidos, tanto vertical como horizontalmente, pode ocorrer aumento do substrato lamoso, o que favorece a expansão do manguezal (BATISTA et al., 2008). Segundo Cahoon et al. (2006), o sistema radicular das espécies de manguezal limita o transporte de sedimentos transportados na coluna d'água, ocasionando a deposição, favorecendo assim a colonização de novas áreas de manguezal, por intermédio da germinação dos propágulos de manguezal presentes. Além da influência nos padrões de circulação de massas d'água e do transporte de sedimentos, as taxas de sedimentação dependem também do sistema radicular de cada espécie de manguezal (GILMAN et al., 2008). Um exemplo de acreção de substrato lamoso sendo colonizado por espécimes de mangues jovens em direção ao canal é observado na Figura 2.10a. Alterações no nível do mar e no padrão de circulação oceânica também podem proporcionar diminuição da área

de manguezal ao favorecer a ação erosiva das águas, como ilustrado na Figura 2.10b.

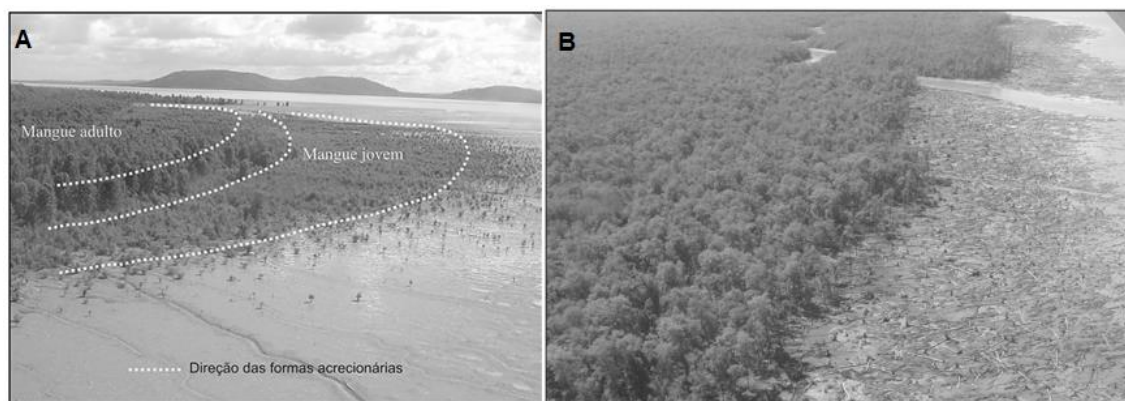


Figura 2.10 - A - Processo e feição morfológica decorrentes da acreção costeira no Cabo Orange (Amapá, norte do Brasil): crescimento do cabo lamoso com sucessão de vegetação pioneira e jovem de mangue estabelecida. B – Linha de costa em erosão ao longo do cabo Cassiporé (Amapá).
Fonte: adaptado de BATISTA et al. (2008)

Por apresentar resposta de alteração de área em função do aumento do nível do mar, o ecossistema manguezal tem sido sugerido como indicador deste fenômeno (SCHAEFFER-NOVELLI, CINTRÓN-MOLERO; SOARES, 2002). Outra possível resposta é a migração do manguezal para áreas adjacentes, quando a elevação do nível do mar propicia o aumento da entrada de água salgada em rios e estuários (SOARES, 2009; DOYLE, 2010). Contudo, o processo de migração depende das formas de uso e ocupação do solo em áreas marginais ao manguezal, principalmente as de origem antrópica. Estas normalmente atuam como barreiras à colonização de novas áreas de bosques de mangues (MCLEOD; SALM, 2006; FARACO, ANGRETO-FILHO; LANA, 2010).

Taxas excessivas de sedimentação decorrentes da elevação do nível do mar podem também propiciar redução de áreas de manguezal, como observado por Lara e Cohen (2003). No município de Bragança, estado do Pará, os autores analisaram a taxa de retração de áreas de manguezal por influência da invasão de areia transportada pelo mar que ao cobrir as camadas de lama causavam asfixia das raízes dos mangues. Neste caso, os autores mencionam que a perda da cobertura vegetal do manguezal correspondeu a um padrão

associado a tendências de longa duração, compatível com as taxas de elevação do nível do mar descritas pela literatura.

A elevação do nível do mar aliada a alterações nas taxas de precipitação também tende a modificar a salinidade do estuário, com consequências para a manutenção do manguezal.

Além dos processos relacionados à elevação do nível do mar como inundação/erosão, deslocamento da AIM, transporte de sedimento e mudanças na salinidade, alterações nos processos de circulação oceânica também podem causar impactos ao manguezal. A ausência de trabalhos descrevendo os impactos da circulação oceânica sobre a dinâmica dos manguezais indica uma lacuna significativa no conhecimento dos padrões de resposta do manguezal às alterações climáticas (ALONGI, 2008).

Embora o manguezal seja aparentemente um ecossistema simples em termos de diversidade de espécies vegetais, sua ecologia é extremamente complexa (LUGO; SNEDAKER, 1974) e há inúmeras interações existentes entre o manguezal e os sistemas oceânico, continental, atmosférico e até mesmo antrópico. Algumas das principais interações que seriam afetadas pelas mudanças climáticas no manguezal são: (i) a dinâmica da geofísica das marés que tem variações de horas, dias e até mesmo de meses, com reflexo direto na zonação de espécies dos bosques de mangues; (ii) o aporte de água doce que ocorre mediante a ação da precipitação e da descarga de rios e água subterrânea que influenciam na entrada de sedimentos e nutrientes no ecossistema; (iii) a influência das correntes marinhas que determinam a deposição de sedimentos, nutrientes e o aporte de água salgada; (iv) formas de usos antrópicos diretos e indiretos podem proporcionar maior ou menor grau de vulnerabilidade do manguezal quanto à interdependência dos bens e serviços providos.

As interações entre o manguezal e os ambientes adjacentes podem proporcionar maior ou menor grau de vulnerabilidade ao processo de elevação do NMRM. De acordo com Mcleod e Salm (2006) características como baixo relevo, presença de barreiras naturais e antrópicas podem proporcionar maior vulnerabilidade ao manguezal. Áreas que apresentem macromarés, altas taxas de acreção vertical e longitudinal tendem a proporcionar maior grau de resistência. A Tabela 2.4 apresenta alguns fatores que podem ocasionar maior ou menor grau de vulnerabilidade do manguezal a processos de elevação do NMRM.

Tabela 2.4 - Características locais que influenciam a exposição do manguezal à elevação do NMRM.

	Condições/ locais de ocorrência de mangues	Processos associados
Mais vulnerável	Ilhas de baixo relevo	- Pequenas taxas de acreção vertical e longitudinal de sedimentos que favorecem processos de inundação e erosão marinha (SHEA et al., 2001).
	Regiões com rede hidrográfica reduzida	- Menor aporte de água doce e sedimentos de origem continental.
	Locais com possibilidade de ocorrência de movimentos tectônicos, extração de água subterrânea e mineração.	- Favorecimento dos processos de elevação do NMRM e inundação.
	Áreas com pequena amplitude de marés e de pouco aporte de sedimentos.	- Alterações na AIM afetam a zonação das espécies, causando perda de diversidade biológica. - Erosão mais intensa que acreção vertical e longitudinal, diminuindo a resistência do manguezal.
	Áreas de intensa atividade antrópica.	- Uso e ocupação antrópica do solo configuram barreiras para a colonização dos mangues.
Menos vulnerável	Ilhas de alto relevo, de solos lamosos bem desenvolvidos.	- Ação de erosão e inundação minimizadas - Resistência à ação de furacões
	Mangues ribeirinhos	- Contribuição alóctone de sedimentos e nutrientes.
	Locais com grandes variações de marés (macromarés)	- A zonação das espécies está adaptada a variações significativas na altura da coluna d'água como resposta ao hidroperíodo das mares.
	Áreas remotas	- Pouca ou nenhuma influência antrópica.
	Regiões adjacentes a outros ambientes costeiros como apícnus e marismas.	- Apícnus são "rotas migratórias" para a colonização de propágulos de angiospermas de manguezal - Apícnus sofrem com a lavagem de marés quando há deslocamentos de AIM
	Alta densidade de manguezais	- Devido ao suprimento constante de propágulos e ao fato que o ecossistema já está bem estabelecido na área.

Fonte: Adaptado de Mcleod e Rodney (2006)

2.2.2 Manguezal como Elemento Atenuador dos Impactos das Mudanças Climáticas na Zona Costeira

Os ecossistemas costeiros e marinhos são componentes importantes no ciclo global de carbono, sendo responsáveis por cerca da metade da absorção fotossintética anual de CO₂ e dos demais gases do efeito estufa (GEE's) da atmosfera (AGEDI, 2014).

Dentre os ecossistemas costeiros, o manguezal desempenha importante papel na atenuação dos impactos das mudanças climáticas, sendo capaz de reter até 18,4 Gt C por ano (BOUILLION et al., 2009). Parte significativa de CO₂ que é absorvido fica retida não apenas na biomassa da vegetação, mas preferencialmente no solo lamoso do manguezal, que devido a condições de anoxia do sedimento mantém o CO₂ em estado reduzido, ou seja, inerte neste sedimento. Mensurações indicam que o manguezal consegue sequestrar até 1,5 t de carbono por ha a cada ano (CONG; ONG, 1990; ONG, 2002). Este valor equivale a aproximadamente todo carbono emitido por veículos motorizados na atmosfera em um ano, para o cenário de emissões do início do século XXI, levando-se em consideração que cada carro tenha usado aproximadamente 2.500 litros de petróleo por ano (ONG, 2002). Segundo Murray et al. (2010), a capacidade do manguezal reter de 6 a 8 t C por ha em apenas um ano, caracteriza este ambiente como elemento importante de atenuação das mudanças climáticas se preservado ou conservado, ou como possível fator de potencialização das alterações climáticas, se for degradado. Além disso, os ecossistemas costeiros como manguezais, marismas tropicais e algas marinhas potencialmente capturarem de 5 a 50 vezes mais carbono que os ecossistemas terrestres (COPERTINO, 2011). O manguezal é o ecossistema costeiro de maior potencial de retenção de carbono por unidade de área por sequestro no sedimento lamoso. A Figura 2.5 compara os valores médios globais e de desvio padrão do potencial de absorção de carbono por ecossistemas costeiros vegetados.

Tabela 2.5 - Taxas médias globais e desvio padrão de sequestro de carbono para ecossistemas costeiros vegetados

Ecossistemas Costeiros	Taxas anuais de sequestro de carbono tCO ₂ eq ⁴ /ha/ano	Biomassa tCO ₂ eq/ha/ano	Solo orgânico tCO ₂ eq/ha/ano
Algas marinhas	4,4 ± 0,95	0,4-18,3	66-1.467
Marismas tropicais	7,97 ± 8,52	12-60	330-4.436
Manguezais	6,32 ± 4,8	237-563	1.690-2.020

Fonte: Adaptado de Murray et al. (2010).

O ecossistema manguezal também oferece proteção à linha de costa contra a ação erosiva das marés, assim como, também constitui uma verdadeira barreira natural de atenuação de impactos de furacões, tempestades e ciclones naturais (HUSRIN, STRUSINSKA; OUMERACI, 2012). Dessa forma, oferece proteção à zona costeira contra os tensores ambientais ocasionados pelas alterações no clima, principalmente para as comunidades ribeirinhas locais (IUCN, 2005).

Várias pesquisas baseadas em observações de campo e mensuração feitas com sensoriamento remoto têm fornecido fortes evidências do papel de amenização dos ecossistemas costeiros em relação aos impactos de tsunamis (DAHDOUH-GUEBAS et al., 2005). O desastre do tsunami no oceano Índico em dezembro de 2004 ocasionou a morte de mais de 200.000 pessoas e prejudicou direta e/ou indiretamente 14 países asiáticos e africanos. Segundo Walter et al. (2008), ficou evidente para a comunidade científica que os impactos do tsunami foram amenizados por áreas de manguezal bem preservadas, fornecendo um forte indicio que a sustentabilidade ambiental do manguezal e a segurança humana em zonas costeiras são inseparáveis. A

⁴ Toneladas de dióxido de carbono equivalente

Tabela 2.6 apresenta alguns valores de amenização monetária e serviços ambientais prestados pelo manguezal à zona costeira em relação aos efeitos das mudanças climáticas na zona costeira.

Tabela 2.6 - Avaliações econômicas de alguns serviços prestados pelos manguezais à zona costeira.

Regulação do serviço	Valores e benefícios	Referência
Prevenção de distúrbios ambientais por tempestades, erosão marinha, etc.	US\$ 4.700,00 ha ⁻¹	Costanza et al. (1989)
	US\$ 3.679,00 ha ⁻¹	Sathirathai e Barbier (2001)
Sumidouro de carbono	155 kg C ha ⁻¹ dia ⁻¹	Clough et al. (1997)
	1500 kg C ha ⁻¹	Ong (1993)
Sumidouro de carbono (média mundial)	~ 6,32 ha ^{-a}	Murray et al. (2010)

Fonte: Adaptado de Bradley (2008).

2.3 Modelagem Computacional para Estudos da Resposta do Manguezal à Elevação do Nível do Mar

O uso de modelagem computacional constitui-se como uma ferramenta útil para entendimento dos impactos da elevação do nível do mar no manguezal, considerando-se duas aplicações principais: a simulação do padrão de resposta do manguezal frente aos impactos da elevação do nível do mar, antes mesmo que estes se manifestem em uma determinada área e a simulação de potenciais alterações nos processos ecológicos.

Segundo Berger et al. (2008), a abordagem da modelagem é adequada para avaliar simultaneamente os efeitos das mudanças ambientais nos manguezais e alterações nos processos ecológicos tais como recrutamento, estabelecimento, crescimento, produtividade e mortalidade de indivíduos arbóreos. Estes autores discutem três modelos - FORMAN, KIWI e MANGRO, parametrizados para avaliar a dinâmica do manguezal para três espécies de

mangues neotropicais (BERGER; HILDENBRANDT, 2000; DOYLE, GIROD; BOOKS, 2003; BERGER et al., 2006).

Os modelos FORMAN, KIWI e SELVA MANGRO são modelos baseados em indivíduos (MBI). Por serem ferramentas adequadas para simular a variabilidade de plantas ou de animais e suas influências em sistemas naturais, os MBI's tornaram-se amplamente aceitos em estudos de ecologia numérica na década de 90 (GRIMM, 1999; DEANGELIS; MOOIJ, 2005). Nestes modelos, há integração hierárquica em diversos níveis de processos ecológicos, parametrizados diretamente e de forma relativamente simples, além de funcionar em diferentes escalas temporais e espaciais.

Os modelos FORMAN, KIWI, e SELVA MANGRO foram desenvolvidos para o entendimento de florestas de mangues em diferentes condições ambientais e de manejo, e parametrizados para características biológicas e fisiológicas de três espécies de mangues neotropicais e também as principais nos mangues brasileiros: *Rhizophora mangle* (mangue vermelho), *Avicennia germinans* (mangue preto) e *Laguncularia racemosa* (mangue branco).

Os modelos FORMAN e KIWI são mais robustos para a simulação da dinâmica dos bosques de mangues e para descrever processos ecológicos e de estrutura do manguezal (BERGER e HILDENBRANDT, 2000; BERGER et al., 2006; BERGER et al., 2008). O SELVA MANGRO é mais direcionado à simulação da dinâmica de paisagem e para grandes escalas espaciais, e conectado a um banco de dados geográfico. A Figura 2.11 demonstra o arranjo estrutural dos modelos FORMAN, KIWI e SELVA MANGRO, quanto à representação das espécies, regras de vizinhança e disponibilidade de fatores abióticos como salinidade, nutrientes e luz.

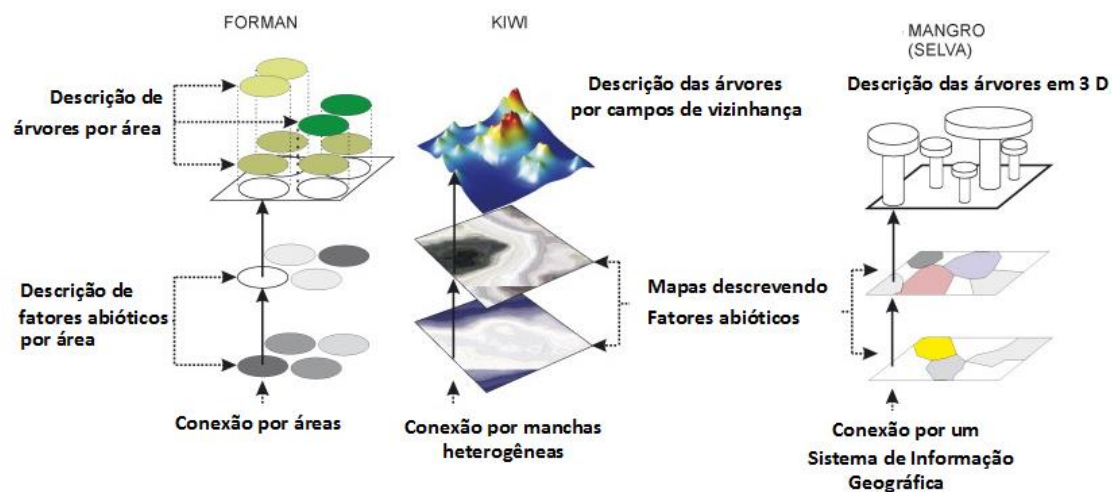


Figura 2.11 - Características dos três modelos para a representação das árvores e disponibilidade de fatores abióticos.
Fonte: Adaptado de Berger et al. (2008).

Destes três modelos, apenas o MANGRO foi utilizado para simular o padrão de resposta do manguezal às mudanças climáticas (Figura 2.12), mais precisamente para avaliar os impactos de furacões (DOYLE; GIROD, 1996) e do processo de elevação do nível do mar oscilando de 0,15 a 1,1 m, de 1940 até meados de 2100, simulando alterações na composição de três espécies de manguezais no sul da Flórida, EUA (DOYLE, GIROD e BOOKS, 2003).

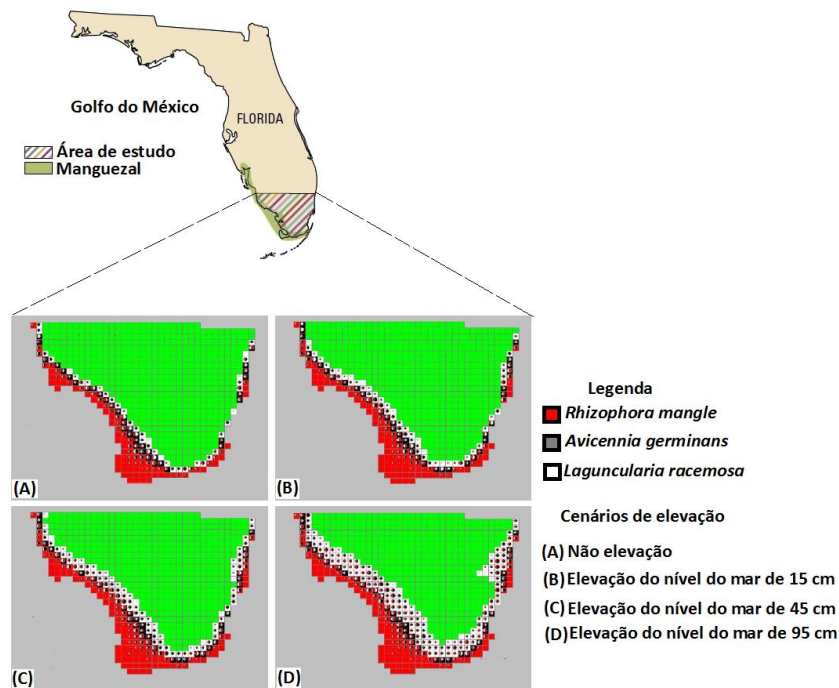


Figura 2.12 - Modelo SELVA MANGRO para simulação de processos de sucessão ecológica com três espécies de mangues em resposta a cenários de elevação do nível do mar no sul da Flórida, EUA.
Fonte: Adaptado de DOYLE, GIROD e BOOKS (2003).

O modelo KIWI foi utilizado na Brasil, na área da Península de Bragança (PA), simulando o processo de sucessão ecológica para três espécies de manguezais - *R. mangle*, *A. germinans* e *L. Racemosa*, em uma área abandonada de cultivo de arroz. Os procedimentos de simulação foram desenvolvidos em três cenários distintos de taxas de crescimento das espécies conforme competição com a vizinhança (BERGER et al., 2006).

Apesar da expressiva área de manguezal no Brasil, da extensão do litoral brasileiro (8.698 km e 514.000 km² de área) e de suas especificidades locais, como a altura de maré que no litoral Norte chega a 10 m (MUEHE, 2010), modelos computacionais em manguezais têm se resumido a pesquisas ecológicas (BERGER e HILDENBRANDT, 2000; WOLFF, KOCH e ISAAC, 2000) e para simulação de uso dos recursos naturais de valor econômico (GRASSO, 1998; PIOU et al., 2007). A única simulação que se tem conhecimento para antecipação dos efeitos da elevação do NMRM no manguezal, é o estudo realizado para a região portuária de Santos/SP, onde os possíveis impactos ao manguezal e a áreas antrópicas decorrentes do avanço

do mar foram mensurados utilizando um modelo estrutural (uma maquete) (ALFREDINI e ARASAKI, 2005)

Nos últimos anos têm-se na literatura internacional novos experimentos de modelagem, não apenas para análise da estrutura ecossistêmica do manguezal - composição das espécies e sucessão ecológica, p.ex., como nos modelos descritos acima - FORMAM, MANGRO e KIWI, mas também, para simular com maior eficiência o padrão de resposta do manguezal a eventos de elevação do NMRM (DOYLE et al., 2010; DI NITO, 2013). Tais modelos são robustos na identificação de áreas com potencial de migração e suscetíveis a processos de erosão e inundação. Como exemplo, pode-se mencionar o SLOPE, modelo desenvolvido por Doyle et al. (2010), que foi projetado para simular alterações na área de manguezal devido à migração ou retração como respostas a elevação do mar e a AIM. Estes experimentos de modelagem não consideram a influência das formas de ocupação do solo de origem antrópica como barreiras à migração do manguezal e não demonstram de forma eficiente o padrão de resistência do manguezal.

Ao simular os impactos da elevação do nível do mar, a modelagem computacional possibilita o diagnóstico prévio do padrão de resposta do manguezal. Como em um laboratório virtual pode-se, por exemplo, simular alterações no deslocamento da AIM, nas taxas de transporte de sedimento, nos processos de acreção vertical e longitudinal de sedimentos, e com isso, é possível se inferir sobre o padrão de resposta do manguezal à elevação do nível do mar, tendo-se por base além da questão climática, as características geográficas e ambientais da região que o manguezal coloniza, assim como, também, de áreas adjacentes que podem atuar como barreiras ou como áreas aptas a serem colonizadas quando houver variação do NMRM.

Cabe ressaltar que por mais sofisticado que seja, um modelo computacional é uma simplificação do sistema ecológico. A falta de dados de campo ou ainda a distribuição rara e/ou pontual dos mesmos, dificulta a parametrização eficiente, o que pode reduzir a capacidade preditiva (generalidade) e a aderência à realidade, ou seja, o resultado será apenas uma simulação e não um dado medido. Além disso, a complexidade da dinâmica dos processos ecológicos do

manguezal com o meio físico dificulta a formulação de relações matemáticas de simplificação para os procedimentos de modelagem, comprometendo eventualmente a precisão dos modelos.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As atividades metodológicas desenvolvidas na presente pesquisa foram organizadas conforme as etapas apresentadas na Figura 3.1, estas, a saber, foram: proposição de um modelo conceitual, implementação do código em linguagem de programação, seleção da área de estudo de caso, simulação e calibração.

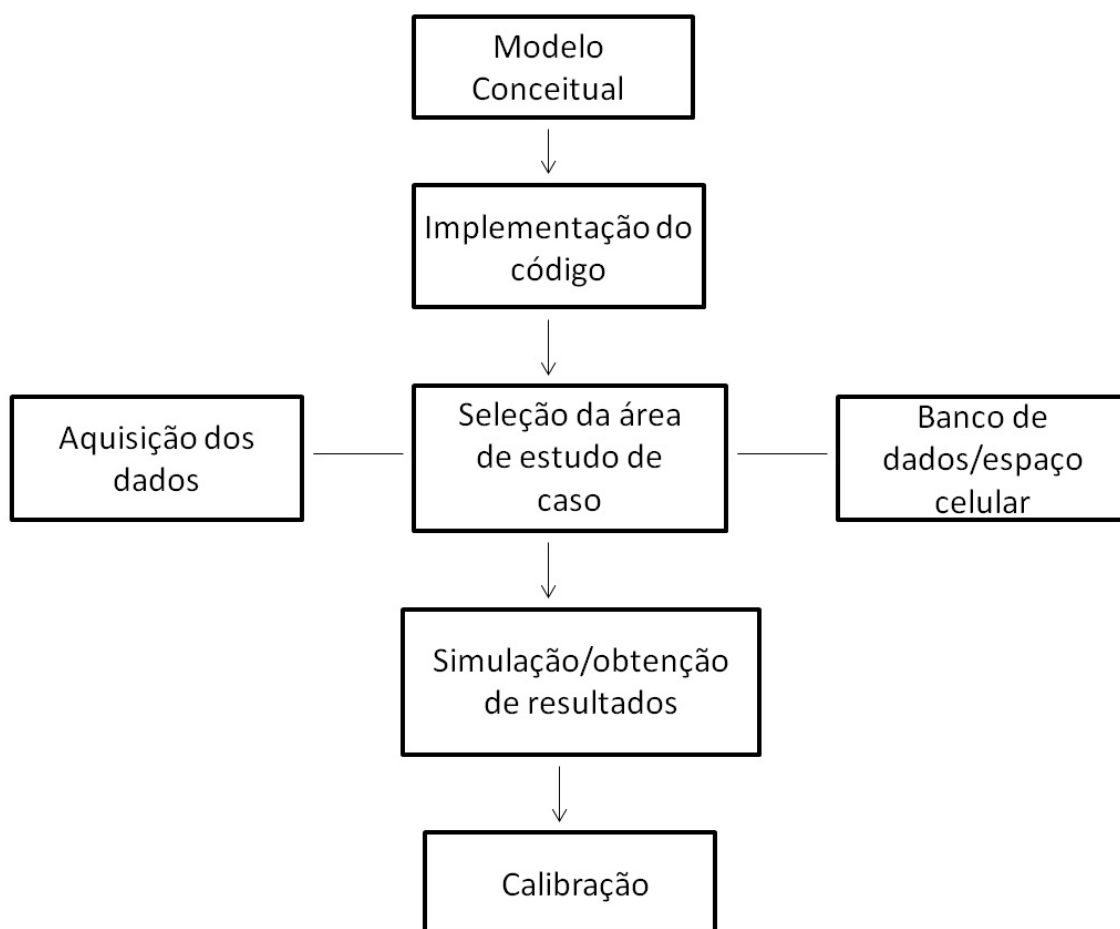


Figura 3.1 - Etapas metodológicas desenvolvidas durante a pesquisa

A primeira etapa desenvolvida foi a proposição de um modelo conceitual que apresentasse os preceitos teóricos que fundamentassem as possíveis respostas do manguezal a elevação do NMRM, tendo por base a literatura especializada. Em seguida deu-se início a implementação do código do modelo em linguagem de programação. Esta etapa foi desenvolvida durante todo o estudo, uma vez que houve várias versões do código. Em seguida, foi selecionada uma área de teste que apresentasse características favoráveis e desfavoráveis a resistência do manguezal à elevação do NMRM.

Posteriormente buscou-se dados para organização de um banco de dados geográfico e criação de um espaço celular. Por fim, foram realizadas as simulações e calibrações para ajustes dos resultados obtidos.

3.1 Modelo Conceitual

O padrão de resposta do manguezal à dinâmica de elevação do NMRM depende de fatores como a topografia, área de influência das marés (AIM), cobertura do solo em áreas adjacentes, classes de solos presentes, dinâmica costeira e a taxa média de aumento do NMRM em um determinado local (MCLEOD; SALM, 2006; LOVELOCK; ELLISON, 2007; ALONGI, 2008), assim como, das respostas humanas às mudanças climáticas na zona costeira, como, por exemplo, a construção de diques (GILMAN et al., 2008).

Para simular os impactos da elevação do NMRM no manguezal, este trabalho propõe um modelo conceitual geral (Figura 3.2), denominado BR-MANGUE, que estratifica os aspectos relevantes para o padrão de resposta do manguezal em quatro componentes, quais sejam: elevação do nível médio relativo do mar (NMRM), formas de uso e ocupação do solo, restrições ambientais e dinâmica do manguezal. A partir destes componentes do modelo conceitual foram criados os respectivos módulos na implementação do modelo computacional.

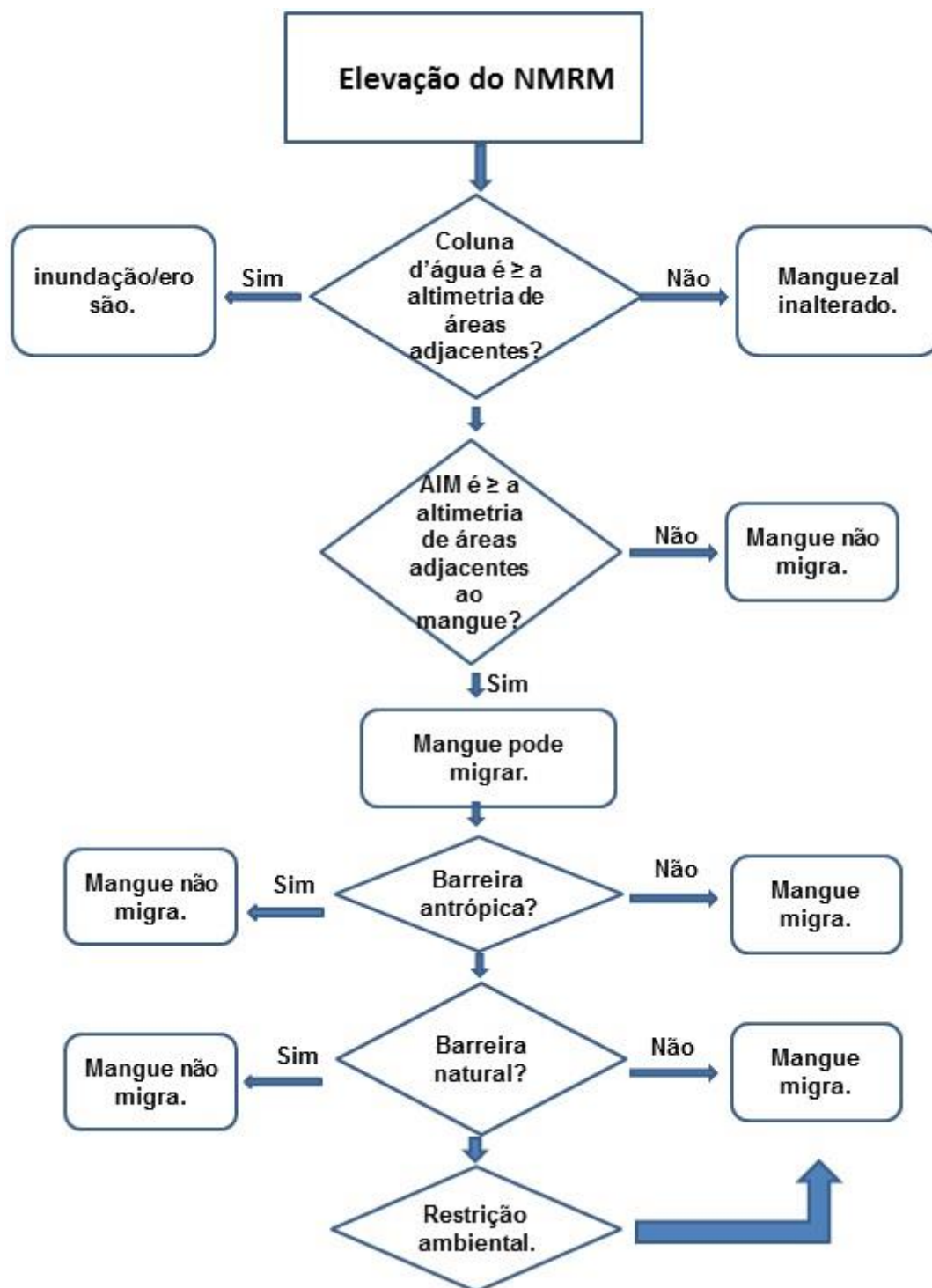


Figura 3.2 - Esquema geral do modelo conceitual BR-MANGUE considerando as quatro componentes – elevação do NMRM, Dinâmica do manguezal, Uso e ocupação do solo e restrições ambientais.

O modelo BR-MANGUE considera que o aumento do nível do mar deve atingir as diferentes classes de cobertura do solo em um espaço geográfico. A cada classe de cobertura do solo tem-se associado um potencial de migração ou de barreira para o manguezal, a partir das condições ambientais e oceanográficas

presentes. Condições geofísicas das marés e da coluna d'água, e o mosaico de cobertura do solo condicionam alterações na estrutura ecossistêmica do manguezal como: aumento da coluna de água, o deslocamento da área sobre influência das marés, inundação/erosão do manguezal e eventos de migração do manguezal em direção ao continente e/ou em direção ao canal do rio (SCAVIA et al., 2002; ALONGI 2008; GILMAN et al., 2008; SOUZA-FILHO, 2005).

No **componente de elevação do NMRM**, a referência para o processo de inundação é a altura da coluna de água em relação à topografia das áreas adjacentes. Quando há avanço do mar em direção ao continente, as áreas de manguezal e outras formas de cobertura do solo podem ser inundadas/erodidas. O processo de inundação/erosão é considerado um impacto negativo sobre o manguezal, uma vez que pode reduzir a área de colonização do ecossistema, com reflexo direto para os bens e serviços prestados pelo manguezal à zona costeira (AGRAWALA et al., 2003). O processo de inundação do manguezal não implica na inundação completa das árvores, mas significa que as áreas de mangue sob influência da variação da maré (baixa-mar e preamar) passam a ser inundadas permanentemente, condenando a vegetação por asfixia das raízes ou por eventos sucessivos de erosão (ESPINOSA e FLORES, 2011).

A amplitude de maré é definida pela diferença entre o valor de preamar e de baixa-mar. Este intervalo é aqui utilizado para definir a área de influência das marés (MIRANDA et al., 2002), ou seja, a região onde o manguezal pode permanecer e/ou migrar (ELLISON, 1993). Com a elevação do nível do mar, a AIM pode ser deslocada longitudinalmente favorecendo a expansão de novas áreas de manguezal à medida que houver intrusão da cunha salina em corpos d'água continentais e/ou em áreas de apicuns (SOARES, 2009) e em associação com processos de acreção longitudinal e vertical de sedimentos (BATISTA et al., 2008).

No **componente de uso e ocupação do solo**, cada classe de cobertura do solo é considerada como uma barreira ou área provável de colonização pelo manguezal. Barreiras antrópicas e naturais impossibilitam o processo de

migração (SOARES 2009; MCLEOD e SALM, 2006). Barreiras antrópicas são representadas neste trabalho por áreas onde a vegetação nativa foi removida e/ou convertida em superfícies impermeáveis, como resultado das atividades humanas. Barreiras naturais são as regiões fora do alcance da AIM e as praias, uma vez que a ação mecânica da força erosiva das ondas inviabiliza a formação de bancos de lama, impossibilitando a colonização pelas angiospermas de manguezal.

O **componente de restrições ambientais** neste modelo conceitual resume-se ao potencial limitante das classes de solo. O manguezal coloniza substratos com elevado teor de silte e argila, com alto teor de salinidade, com forte influência das marés e em condições próximas à anóxia, ou seja, bancos de lama (LUGO e SNEDAKER, 1974; MCLEOD e SALM, 2006). Classes de solo que não possibilitem a colonização pelo manguezal são consideradas restritivas. Neste componente também estão representados os processos de modificação do sedimento, tais como a formação de bancos de lama (acrecção longitudinal) e o aumento na altura do banco de lama (acrecção vertical). A medida que houver elevação do NMRM e o deslocamento da AIM, o substrato lamoso onde o manguezal coloniza tende a não ser estático e começa a sofrer alterações por inundação, taxas de sedimentação vertical e longitudinal. O aumento da coluna de lama e deslocamento horizontal (acrecção vertical e longitudinal) favorecem a formação de novos bancos de lamas que vão ser colonizados por manguezais jovens, através da germinação dos seus propágulos.

A dinâmica de sedimentação em certas circunstâncias, tende a influenciar o componente de uso e ocupação do solo, pois pode alterar as classes de solos presentes quando há formação de novos bancos de lama, e também, o componente de elevação do NMRM pode ser influenciado, uma vez que, quando há acreção vertical de sedimento, a altura do banco de lama pode se contrapor a elevação da coluna d'água, minimizando assim os seus efeitos.

O componente de **dinâmica de manguezal** representa os impactos resultantes das interações entre o aumento do NMRM sobre o terreno, deslocamento da AIM, o padrão de ocupação do solo e as restrições ambientais à colonização

do manguezal. Destas interações têm-se as condições para a resistência, migração ou perda de áreas de manguezal.

Apesar de ser considerado indicador da elevação do nível do mar, o ecossistema de manguezal resiste a este processo através das características adaptativas e fisiológicas de sua vegetação típica (ESPINOSA e FLORES, 2011). A capacidade de resistência do manguezal à elevação do NMRM é representada nos processos de dinâmica sedimentar (acrecção longitudinal e vertical): onde a taxa de acreção vertical de sedimento excede a taxa de elevação do nível do mar há resistência do manguezal (MCLVOR et al., 2013). Os sistemas radiculares das angiospermas contribuem para a sedimentação do substrato lamoso (GILMAN et al., 2008)

Este modelo conceitual permite a adição futura de outros componentes relevantes para a dinâmica ecossistêmica do manguezal, que não foram considerados nesta abordagem, como por exemplo, a hidrologia continental, variações climáticas (precipitação) ou circulação oceânica. Os componentes propostos são ainda passíveis de complexificação, a partir de pressupostos teóricos subjacentes. Cada componente deste modelo conceitual proposto corresponde a um módulo computacional que implementa os respectivos pressupostos teóricos.

3.2 O exercício de Modelagem - construção do modelo e simulação

3.2.1 Plataforma de Modelagem

O modelo conceitual foi materializado em um experimento computacional usando a plataforma de modelagem espacialmente explícita integrada com bases de dados geoespaciais TerraME (<http://www.terrame.org>), desenvolvida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pela Universidade de Outro Preto (UFOP). O TerraME é um ambiente para modelagem dinâmica espacial com suporte para modelos baseados em autômatos celulares e agentes, com base integrada em um ambiente 2D denominada de espaço celular (CARNEIRO et al., 2013).

O código do modelo conceitual implementado utilizando a linguagem de programação Lua é disponibilizado no apêndice A. A linguagem Lua é um software livre de código aberto, relativamente simples, porém robusta e com suporte para outras linguagens computacionais (<http://www.lua.org/>).

O procedimento de implementação utilizou o modelo computacional de autômatos celulares, isto é, baseado em um sistema lógico que tem o conceito de célula como unidade fundamental. Cada célula tem um sistema de vizinhança com as demais células do espaço celular, um estado discreto e atributos que podem variar durante a simulação de acordo com as regras de transição do modelo (WOLFRAM, 1983).

3.3 Área de Estudo: Ilha do Maranhão

A Ilha do Maranhão no nordeste do Brasil foi selecionada como estudo de caso para o exercício de modelagem aqui proposto por apresentar características mistas e especificidades geográficas de diferentes graus de suscetibilidade do manguezal a elevação do NMRM, como: presença de vasta área de manguezal, grande amplitude de marés (até 6 m) e por ser fortemente influenciada pela urbanização que causa inúmeros impactos ao manguezal. A Ilha do Maranhão, também conhecida como Ilha de São Luís ou Ilha de Upu Açu (Figura 4.1) é um arquipélago com mais de 50 ilhas de vários tamanhos e procedências, localizada na costa norte do litoral brasileiro, na Amazônia brasileira entre 2°24'10"S-2°46'37"S e 44°24'30"W-43°59'43"W. A ilha possui 184,73 km² de manguezais (REBELO-MOCHEL; CASTRO, 2003) e é densamente ocupada. Inclui a cidade de São Luís, capital do Maranhão e os municípios de São José de Ribamar, Raposa e Paço de Lumiar (ver Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - População e densidade demográfica dos municípios que constituem a Ilha do Maranhão.

Município	Pop. Total	Pop. Urbana	Pop. Rural	Densidade demográfica
São Luís	1.014.837	958.522	56.315	1215,69
São José de Ribamar	163.045	37.709	125.336	419,82
Paço de Luminar	105.121	78.811	26.310	842,63
Raposa	26.327	16.675	9.652	409,10

Fonte: IBGE, Censo Demográfico (2010)

O Estado do Maranhão possui um número de habitantes da ordem de 6.574.789 (Censo 2010 - IBGE) e sua capital São Luís está entre as 13 capitais brasileiras com maior população - 1.014.837 habitantes. Em relação à densidade demográfica, se encontra na 16ª posição do maior para o menor, ficando Fortaleza em primeiro lugar com 7.786,52 hab./km² (IMESC, 2011). Na região da Ilha do Maranhão, São Luís apresenta a maior densidade demográfica concentrando, aproximadamente, 94,45% da sua população na área urbana.

O relevo da ilha é caracterizado por ondulações suaves com altitudes máximas em torno de 60 metros (PEREIRA e ZAINE, 2007) o que favorece intensa intrusão marinha nos rios e extensas áreas estuarinas (SILVA JUNIOR et al., 2007). O litoral é intensamente recortado, com um perímetro de aproximadamente 626 km, ocupado em 90% por manguezais (Figura 3.3).

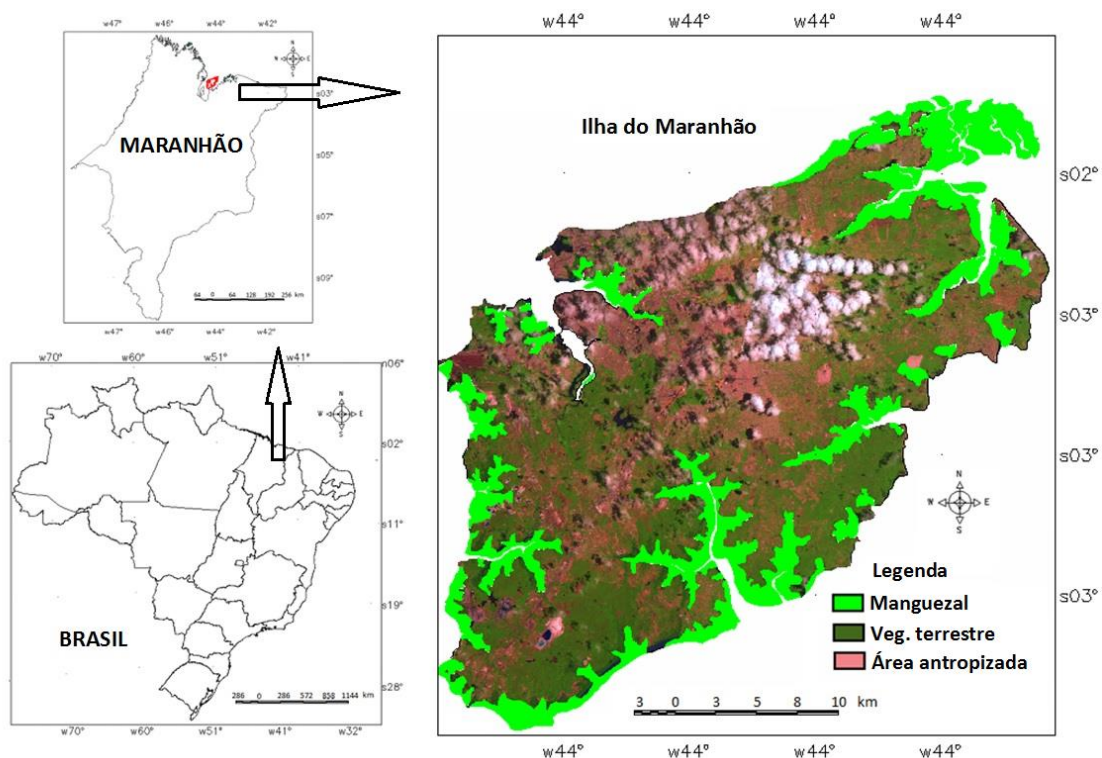


Figura 3.3 - Área do estudo: Ilha do Maranhão (MA), região Nordeste do Brasil. Desta para a área de manguezal presente na Ilha do Maranhão.

A Ilha do Maranhão é marcada pela presença de macromarés com amplitudes de até 6 metros (FERREIRA, 1988). A dinâmica da intrusão salina e a deposição de sedimentos ocasionada pela ação dos rios e das marés influenciam as características pedológicas da ilha, resultando em três classes predominantes de solos (EMBRAPA, 2002): solos indiscriminados de mangue, latossolo amarelo textura média e podzólico vermelho-amarelo concrecionário, descritos a seguir segundo (REBELO-MOCHEL; CASTRO, 2003).

- **Solo indiscriminado de mangue** - ideal para a colonização da vegetação típica de mangue, com solos gleizados, muito mal drenados, com altos teores de sais provenientes da água do mar e de compostos de enxofre, formados em áreas sedimentares baixas e alagadas onde ocorre acúmulo de matéria orgânica no litoral. Nesta classe, estão os Solonchaks⁵ que apresentam horizontes sálicos, com elevados teores

⁵ Classe de solo salino. (rever fontes aqui)

de sais diversos e alguns solos tiomórficos⁶ que contém elevados teores de sulfatos e/ou enxofre elementar. No litoral maranhense, os solos indiscriminados de mangues estão distribuídos ao longo da faixa costeira da baixada litorânea, nas proximidades das desembocaduras de rios e margens de lagoas sob influência das marés, onde a diminuição das correntes de água favorece a deposição de sedimentos finos em mistura com detritos orgânicos. Os detritos orgânicos são originados pela decomposição de plantas dos mangues e pela intensa atividade biológica produzida, principalmente pelos caranguejos abundantes nestes terrenos lamacentos.

- **Latossolo amarelo de textura média** - é uma unidade caracterizada por possuir horizonte B latossólico, de coloração amarela e transições graduais ou difusas entre seus horizontes. São solos profundos de baixa fertilidade natural, baixa saturação de bases e ácidos a fortemente ácidos. Apresentam perfil com sequência de horizontes A, B e C, e bem drenados. O teor de argila no horizonte B pode variar de 15 a 35% com predominância de minerais 1:1, principalmente do grupo da caulinita. Esta classe de solo é originada de sedimentos da Formação Barreiras do Terciário, sendo encontrada na zona denominada de Tabuleiros Costeiros, com relevo plano e suavemente ondulado e com vegetação de floresta subcaducifólia e subperenifólia.
- **Podzólico vermelho-amarelo concrecionário** - compreende solos com sequência de horizontes A - Bt - C, com grande quantidade de calhaus e cascalhos de origem laterítica, em parte ou ao longo de todo o perfil. Geralmente estão associados às áreas de relevo forte ondulado, recobertas por vegetação do tipo Floresta tropical subperenifólia dicótilo-palmácea (babaçual).

⁶ O tiomorfismo caracteriza-se pelo forte odor de gás sulfídrico na amostra do solo saturado de água.

Na Ilha do Maranhão, a hidrodinâmica da costa submersa e o fluxo e refluxo das macromarés em associação com a atividade eólica, modelam a planície litorânea que é dominada por processos marinhos e fluviomarinheiros que dão origem às praias, mangues, vasas, apicuns, lagunas e falésias, enquanto na área de fluxo indireto ocorrem os pântanos (FEITOSA, 2013).

A ação do fluxo e refluxo das correntes de marés é responsável pela distribuição dos sedimentos que tendem a acentuar os pontões lodosos que avançam pelo mar e pela formação de ilhas que sugerem uma origem ligada ao fracionamento dos bancos de lama por ocasião das marés equinociais (AB'SABER, 1960). O manguezal tem papel primordial nos processos de sedimentação e consequentemente na formação de novos bancos de lama. O processo de sedimentação é favorecido pelos sistemas radiculares que constituem obstáculos ao deslocamento do fluxo das marés, característicos da vegetação de mangues ao longo de todo o litoral maranhense.

No que se refere à vulnerabilidade da Ilha do Maranhão aos efeitos das mudanças climáticas, tendo-se por base o estudo de Nicolodi e Petermann (2010), a área objeto de estudo da presente pesquisa é mencionada como de alta vulnerabilidade (Figura 3.4). A Ilha do Maranhão apresenta baixo relevo com altitude máxima na ordem de 60 m, amplitude de marés que ultrapassam os 6 m e também possui uma grande densidade demográfica, principalmente na capital São Luís.

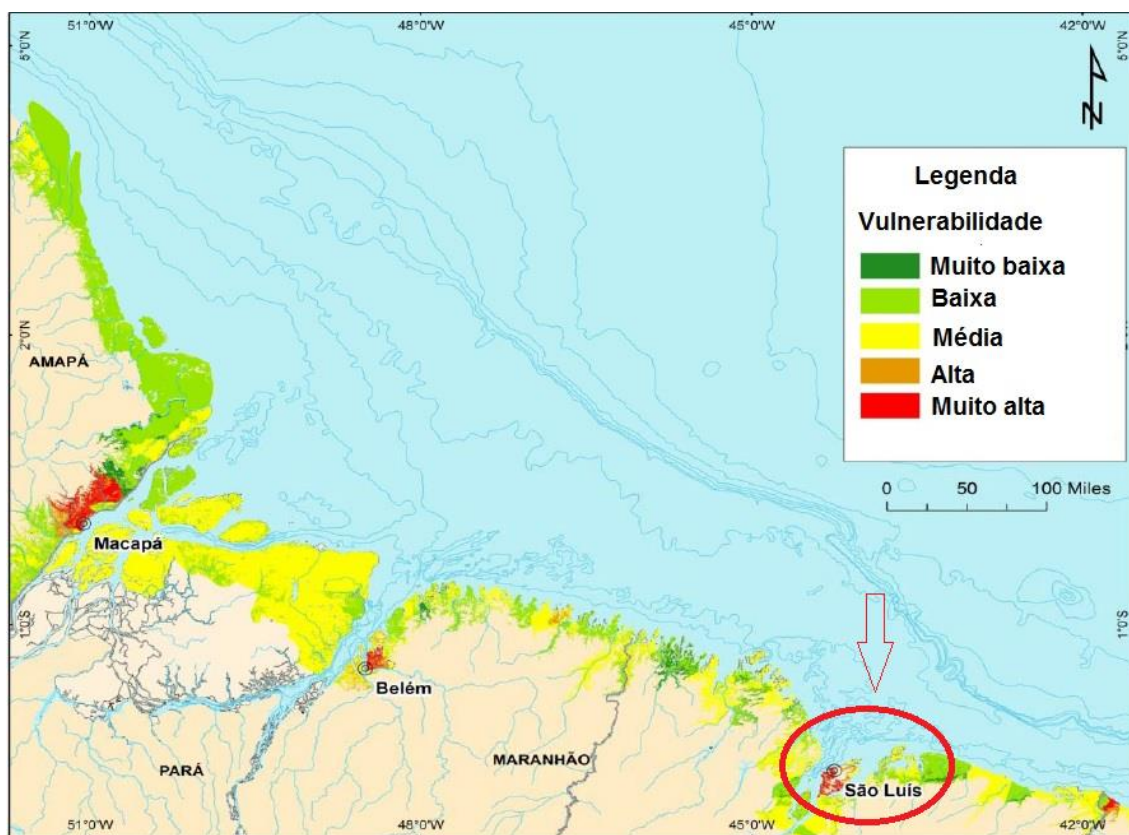


Figura 3.4 - Vulnerabilidade do litoral Norte brasileiro às mudanças climáticas.
Fonte: Nicolodi e Petermann (2010)

3.4 Estimativa da Área de Influência de Maré (AIM)

A dinâmica da maré no Maranhão por ter duas baixa-mares e duas preamares com alturas aproximadamente iguais durante o período de um dia lunar é considerada semidiurna. De acordo com a classificação de Davies (1964)⁷, o litoral maranhense é do tipo macromareal, pois suas marés, denominadas macromarés, podem atingir amplitudes de mais de 4 metros (DAVIES, 1964). No caso da Ilha do Maranhão, a amplitude de maré é de aproximadamente 6 m (FERREIRA, 1988).

A AIM, também conhecida como estirâncio, consiste no ponto médio das baixa-mares indo até o valor médio das preamares de um determinado local. Para estimativa da área de AIM na área do estudo de caso, foram utilizadas as

⁷ As variações de marés podem ser classificadas em micro, meso e macromarés de acordo com os respectivos valores: < 2 m (micro), de 2 a 4 m (meso) e a partir de 6 m (macro).

simulações de baixa-mares e preamares feitas para o Porto do Itaqui, situado em São Luís (MA) para o ano de 2012 (Figura 3.5). Estas simulações de marés foram obtidas junto à Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas/>).

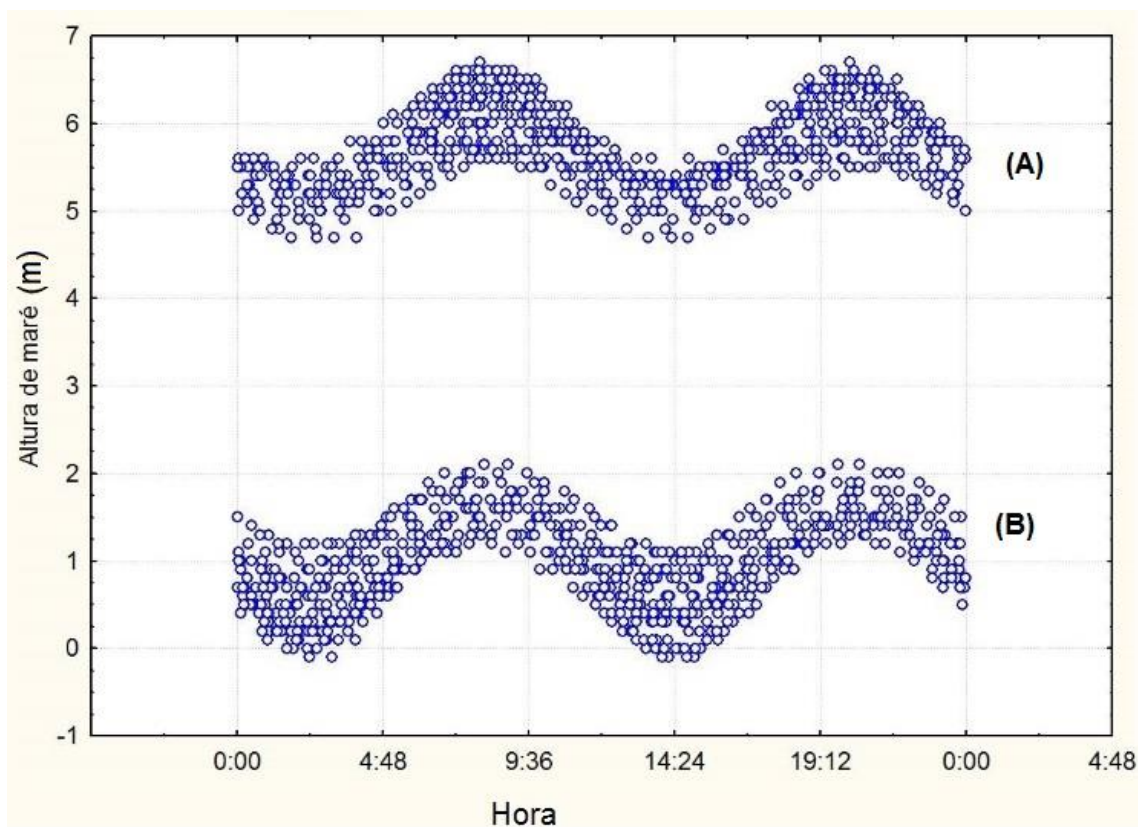


Figura 3.5 - Eventos de preamar (A) e baixa-mar (B) simulados para o Porto do Itaqui (São Luís, MA) em 2012.
Fonte: Tábua de maré da Marinha

Os valores mais baixos simulados de baixa-mar para o ano de 2012 oscilaram de aproximadamente 0 a 0,9 m, com uma média de aproximadamente 0,53 m. Para a preamar, os valores mais expressivos apontados pela Tabua de maré da Marinha variaram de 6 a 6,9 m; com média aproximada de 6,25 m. Segundo Miranda et al. (2005), obtém-se a AIM pelo cálculo da amplitude do valor médio da preamar em relação a baixa-mar. Assim, o valor de AIM das marés adotado foi de aproximadamente 6 metros para a Ilha de São Luis, compatível com a literatura.

3.5 Base de dados e organização do espaço celular

O banco de dados contendo as informações de entrada para o procedimento de modelagem e o espaço celular utilizado para desenvolvimento e aplicação do modelo foi criado no TerraView 4.2.0, um sistema de informação geográfica desenvolvido pelo INPE (INPE, 2011).

Como dados básicos para a modelagem, foram utilizados os Planos de Informação contendo o mapeamento de uso e cobertura do solo, o mapa de solos e o mapa altimétrico. Para a Ilha do Maranhão, o mapeamento de áreas de manguezal foi feito inicialmente pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) para o ano de 2008, e então atualizado pela interpretação visual de imagens ETM/Landsat 5 (220/62, 2012) obtidas do catálogo de imagens do INPE. Estas imagens Landsat também foram utilizadas para classificar as demais classes de cobertura do solo: água, área antrópica, vegetação de terra firme e praia. Como mapa de classes de solos, utilizou-se o mapeamento realizado pelo Zoneamento Costeiro do Estado do Maranhão, em escala 1:100.000 (REBELO-MOCHEL, 2003). Os dados de altimetria são provenientes do projeto Brasil em Relevo da EMBRAPA Monitoramento por Satélite em escala de 1:250.000 (MIRANDA, 2005).

O espaço celular criado contém 94.704 células de 1 ha de área (100 x 100 m), interiores ao perímetro da área de estudo (Figura 3.6). Como um sistema baseado em autômatos celulares, inicialmente cada célula tem um estado que a caracteriza e um conjunto de atributos. Durante os procedimentos de simulação, os estados e os atributos de cada célula podem ser alterados de acordo com as regras de transição do modelo.

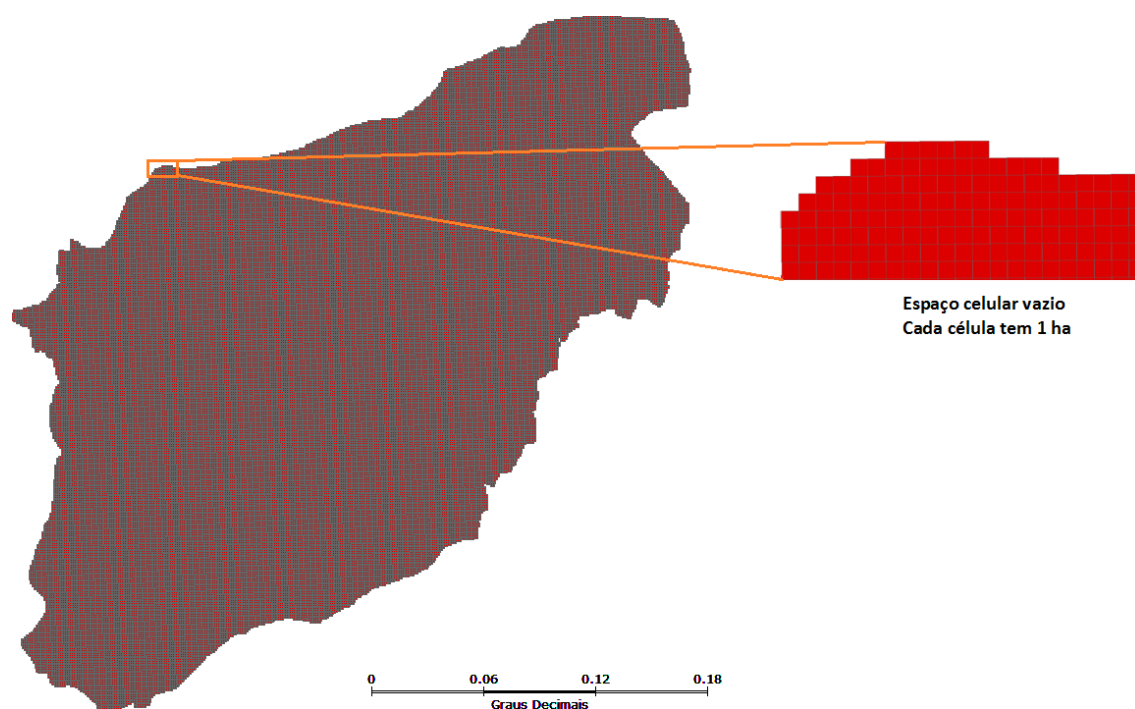


Figura 3.6 - Espaço celular vazio correspondente ao perímetro da Ilha do Maranhão.

O estado das células corresponde à classe de cobertura do solo e os atributos correspondem aos valores de classe de solo, altimetria e AIM. As classes de cobertura, bem como todos os outros atributos de entrada para a modelagem foram atribuídos às células através do algoritmo de preenchimento do espaço celular do TerraView 4.2.0. A classe de cobertura do solo de maior área na célula foi considerada como o estado inicial de cada célula (Figura 3.7).

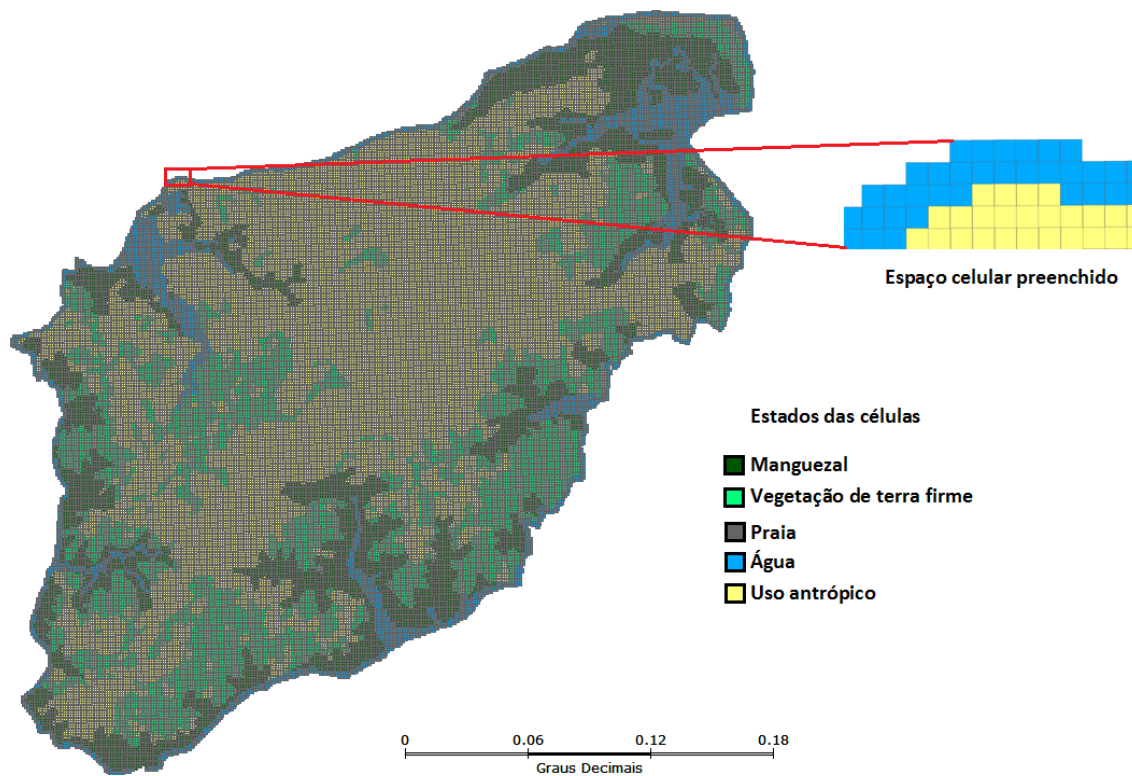


Figura 3.7 - Espaço celular preenchido com as formas de uso e ocupação do solo que caracterizam o estado inicial das células.

Os atributos solo, altimetria (altitude) e AIM foram associados às células por critérios distintos. Para a classe de solo presente na área objeto de estudo, utilizou-se a classe mais frequente (Figura 3.8).

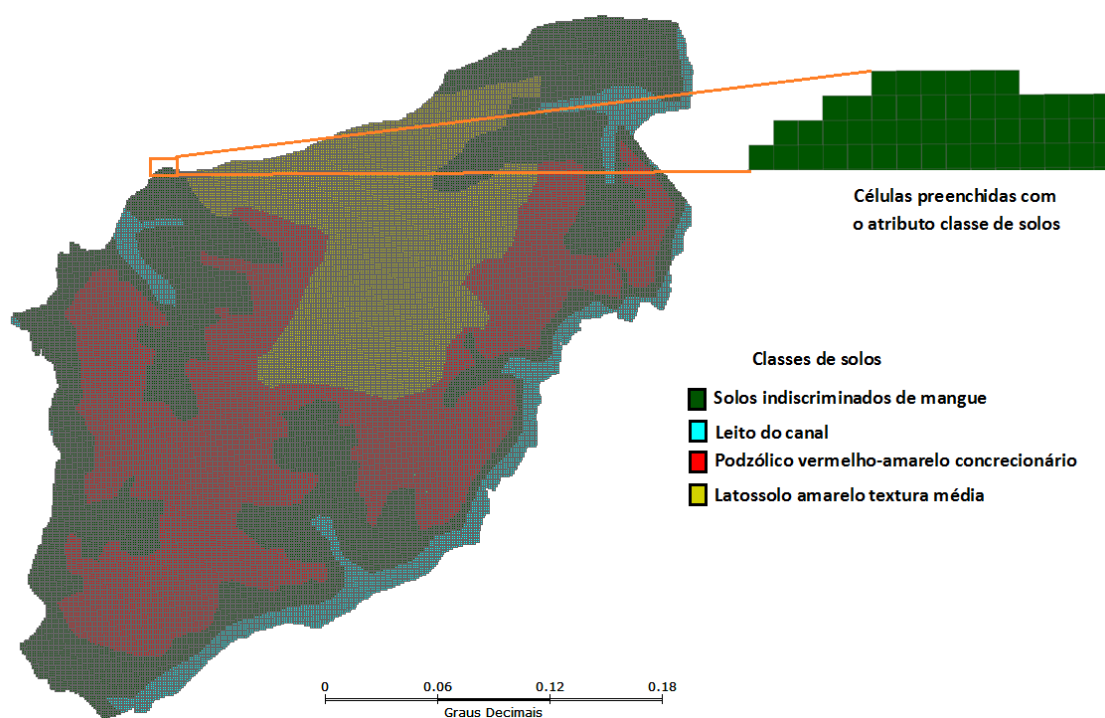


Figura 3.8 - Espaço celular preenchido com o atributo classe de solos.

Para o atributo altimetria, atribuiu-se o valor mínimo de altitude de cada célula, para representar o relevo da área (Figura 3.9). O valor de AIM correspondeu ao valor único obtido para a Ilha do Maranhão (6 m), conforme a literatura consultada e posteriormente validado pelos dados de maré da DHN.

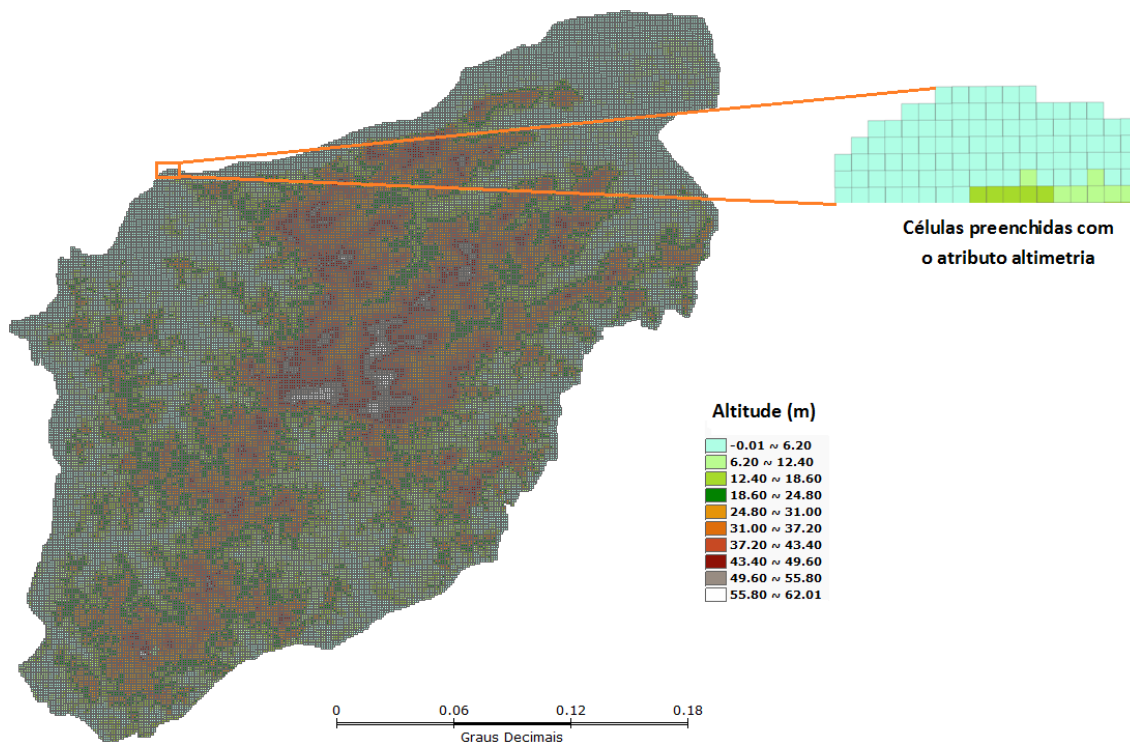


Figura 3.9 - Espaço celular preenchido com o atributo altimetria (altitude).

3.6 Experimento de Modelagem (BR-MANGUE)

O modelo desenvolvido neste trabalho foi elaborado conforme os preceitos teóricos descritos no modelo conceitual. Os procedimentos de modelagem foram realizados com o intuito de simular os seguintes eventos: (i) avanço do nível do mar sobre o continente; (ii) deslocamento da área de influência das marés; (iii) acreção vertical (aumento da coluna de lama) e longitudinal de sedimento (formação de novos bancos de lama); (iv) variação das áreas de manguezal (área total, área remanescente, área perdida e área migrada),

- Área total de manguezal – corresponde ao somatório das áreas de manguezal preexistentes no espaço celular, com áreas de manguezal jovens que são originadas pelo processo de migração.
- Área de manguezal remanescente – corresponde à área de manguezal já existente na área de estudo, e que não se perde quando ocorre um evento de elevação.

- Área de perda de manguezal – corresponde a área de manguezal que é suprimida a cada evento de elevação do NMRM.
- Área de manguezal migrada – corresponde às áreas de manguezal jovens que conseguem migrar a cada evento de deslocamento da AIM.

Simulação da Elevação do Nível Médio Relativo do Mar (NMRM)

Na simulação do modelo BR-MANGUE, adotou-se um cenário de elevação total do nível do mar igual a 0,97 m⁸ considerando o intervalo de tempo 2012-2100, com 88 eventos intermediários de elevação, distribuídos como uma progressão aritmética de razão 0,011 m (r) conforme a equação (3.1):

$$\text{Elevação} = C_a + (\text{evento de elevação} \times r) \quad (3.1)$$

Onde:

- “Elevação” – corresponde à elevação do NMRM em cada célula de água em um determinado evento de elevação.
- “C_a” – Coluna d’água nas células de água a cada evento de elevação.
- “evento de elevação” – São os passos de elevação do NMRM adotados: cada passo de elevação corresponde a um ano. No modelo proposto serão 88 eventos de elevação que equivalem ao intervalo de tempo compreendido de 2012 a 2100;
- “r” – Razão de incremento do NMRM a cada evento de elevação, com valor fixo de 0,011 m.

À medida que houver elevação do NMRM, o fluxo de água entre as células será determinado mediante a altura da coluna d’água em relação à altitude das células vizinhas, conforme a equação (3.2):

⁸ Conforme cenário mais alarmante (RCP8) do IPCC (2013).

$$\text{Fluxo} = \text{Elevação} / \text{número de células vizinhas} \quad (3.2)$$

Onde:

- “Fluxo” – fluxo de água que ocorre entre células de água e suas células vizinhas que possuem altitude menor que a coluna d’água.
- “Elevação” – elevação do NMRM que ocorre em cada evento de elevação nas células de água.
- “células vizinhas” – número de células vizinhas às células de água e que possuem altitude menor que a altura da coluna d’água.

A regra de vizinhança no espaço celular, que condiciona o deslocamento de água nas células, prevê que cada célula pode possuir até oito células vizinhas (Figura 3.10). Este padrão de vizinhança é fundamental para o fluxo de água entre as células, para a simulação do processo de acreção longitudinal, para o deslocamento da AIM e para a migração de áreas de manguezal.

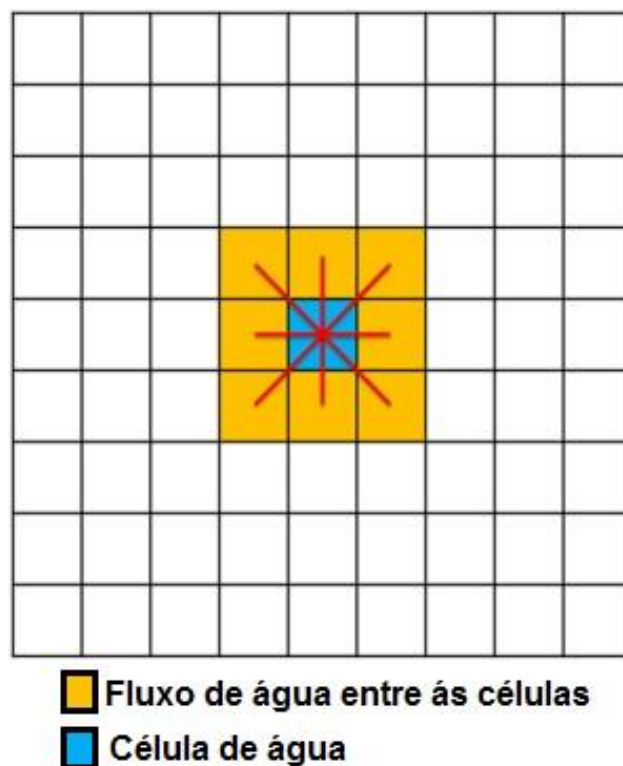


Figura 3.10 – Fluxo de água no espaço celular onde cada célula pode ter até oito células vizinhas.

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2011).

A elevação do nível do mar modifica os padrões de sedimentação do material transportado pela coluna d'água (COHEN et al., 2009). Para a simulação da acreção vertical de bancos de lama que podem ser colonizados pelo manguezal, utilizou-se a equação (5.3) estimada por Alongi (2008):

$$Y = 1,693 + 0,939x \quad (3.3)$$

Onde:

- “y” – valores de acreção vertical de sedimento em mm.
- “x” – valores de elevação do NMRM em mm.

A equação 5.3 define a relação entre taxas de sedimentação (acreção vertical) para ambientes de manguezal e valores de elevação do mar, com $R^2 = 0,704$ e $p < 0,001$ (ALONGI, 2008).

3.6.1 Regras de Transição no Modelo BR-MANGUE

A situação inicial das formas de uso e ocupação do solo determina o estado inicial de cada célula como água, mangue, uso antrópico, vegetação de terra firme e praia, contendo seus atributos - altitude, tipo de solo e AIM. Os estados e atributos das células, a cada evento de elevação serão alterados mediante as seguintes regras de transição:

- I. À medida que houver elevação NMRM poderá haver fluxo de água entre as células. O padrão de fluxo é determinado em relação à altura da coluna d'água, a altitude das células adjacentes e ao número de células vizinhas.
- II. O sistema de vizinhança das células de água identificará células de outros estados passíveis de serem inundadas.
- III. A inundação de uma célula cujo estado inicial seja diferente de água, ocorre quando o valor do fluxo de água que chega à mesma, acrescido de sua altitude, for menor ou igual à altura da coluna d'água da célula vizinha.

- IV. No caso de inundação de células de manguezal, as células podem resistir à elevação da coluna d'água se a taxa de acreção vertical do sedimento somada à altitude da célula, for maior ou igual à altura da coluna d'água da célula vizinha.
- V. A AIM (o estirâncio) será determinada pela amplitude de maré (MIRANDA et al., 2005).
- VI. Sempre que houver elevação do NMRM, a área AIM será deslocada longitudinalmente, conforme valor de acréscimo do NMRM.
- VII. A simulação da migração de novas áreas de manguezal como resposta à elevação do NMRM será efetivada conforme o deslocamento na AIM. Isto porque o manguezal só pode colonizar locais que estejam dentro da AIM (FIELD, 1995; FARACO, ANGRETO-FILHO e LANA, 2010).
- VIII. Mesmo havendo deslocamento da AIM, o processo de migração de novas áreas de manguezal só terá sucesso, caso não existam barreiras naturais e antrópicas que possam inviabilizar a colonização do manguezal.
- IX. Além da barreira antrópica, as barreiras naturais correspondem às células cujo o estado seja praia, ou solo inadequado à colonização do manguezal ou possuir altitude maior que a AIM.
- X. A migração de manguezal também depende da classe de solo presente na célula e das taxas de acreção longitudinal e vertical de sedimento.
- XI. O manguezal só pode colonizar células que possuam o “atributo solo” igual ao solo indiscriminado de mangle.
- XII. Novos bancos de lama (solo indiscriminado de mangue) podem ser formados sempre que houver o deslocamento da AIM (acreção longitudinal) e a sua altura é determinada pela equação apresentada por Alongi (2008) para a acreção vertical de sedimento como resposta à elevação do nível do mar.

3.7 Ajuste do experimento de modelagem

O procedimento de ajuste adotado para o experimento de modelagem foi o denominado de “tentativa e erro”. Neste, o usuário do modelo entre uma simulação e outra faz ajustes nos valores dos parâmetros tendo-se por base um conjunto de dados observados e/ou através de seu conhecimento teórico ou empírico do objeto foco da pesquisa (REFSGAARD et al., 1998). Trata-se de um procedimento manual que acrescenta certo grau de subjetividade aos resultados simulados, mas é um método válido de calibração.

Após cada simulação de evento de elevação e execução das regras de transição definidos no âmbito do BR-MANGUE, observavam-se os valores de área de manguezal como área total, remanescente, migrada e perdida. Assim, eventuais divergências eram corrigidas entre padrões de respostas conflitantes do manguezal em intervalos de eventos de elevação próximos, isto é, a cada 8 eventos de simulação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho representam o primeiro exercício brasileiro de modelagem para simulação da resistência potencial do manguezal frente ao aumento do nível do mar. Tomando-se como área geográfica de aplicação e teste do modelo a Ilha do Maranhão, e implementando os principais processos condicionantes, identificados e descritos em um modelo conceitual, apresentam-se a seguir os resultados provenientes da consolidação da ferramenta de modelagem e do exercício de simulação realizado.

A cada evento de elevação, o BR-MANGUE calcula sobre o espaço celular os resultados do padrão de resposta do manguezal em termos de área total, área remanescente, área perdida e área migrada. São também apresentados os valores de deslocamento da AIM, da taxa de acreção vertical de sedimento e de formação de novos bancos de lama (acreção longitudinal).

O código do modelo (Anexo A) foi implementado de acordo com os preceitos teóricos apresentados no modelo conceitual. A Figura 4.1 apresenta um fluxograma que demonstra a estrutura organizacional do BR-MANGUE, ou seja, como o mesmo foi idealizado para propor um melhor entendimento dos processos relacionados aos padrões de respostas do manguezal a elevação do NMRM.

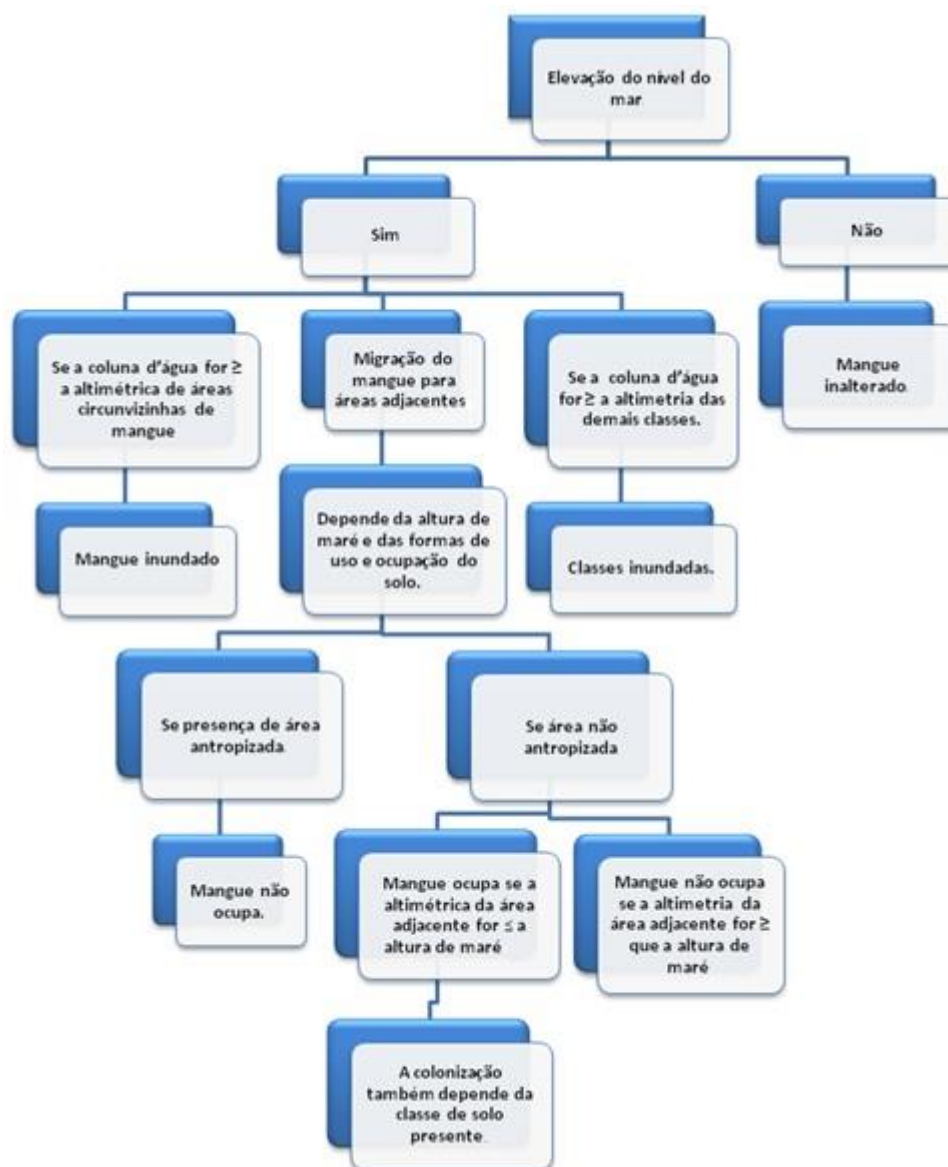


Figura 4.1 – Arranjo estrutural do BR-MANGUE, onde é evidenciado a lógica de implementação do modelo conceitual em linguagem de programação.

O BR-MANGUE simulou a elevação do NMRM para a área de estudo em 88 (oitenta e oito) eventos de elevação de 0,011 m a 0,97 m, em progressão aritmética de razão 0,011 m (Figura 4.2). A distribuição matemática para a elevação do NMRM para o período de 2012 a 2100 corresponde ao cenário mais alarmante de elevação média global do mar apresentada no AR5-IPCC, isto é, 0,97m de elevação média global em meados de 2100 (IPCC, 2013).

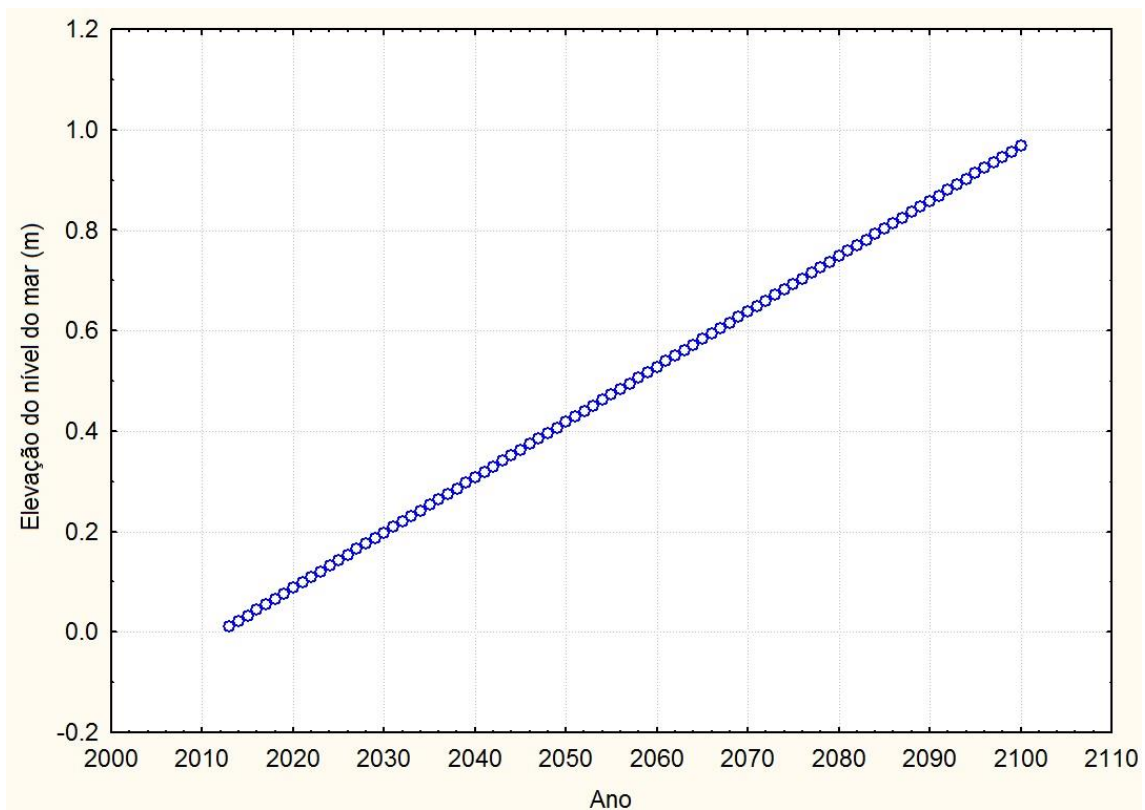


Figura 4.2 - Distribuição matemática adotada para a elevação do NMRM.

A condição inicial de área de manguezal na Ilha do Maranhão correspondente ao mapeamento de 2012 era de aproximadamente 17.387 ha. Com a simulação, houve alterações no padrão de resistência (resistência e declínio) com variações do NMRM, conforme apresentado na Figura 4.3. A área total e remanescente de manguezal calculadas para cada evento de simulação apresentaram 13 padrões de resistência e declínio.

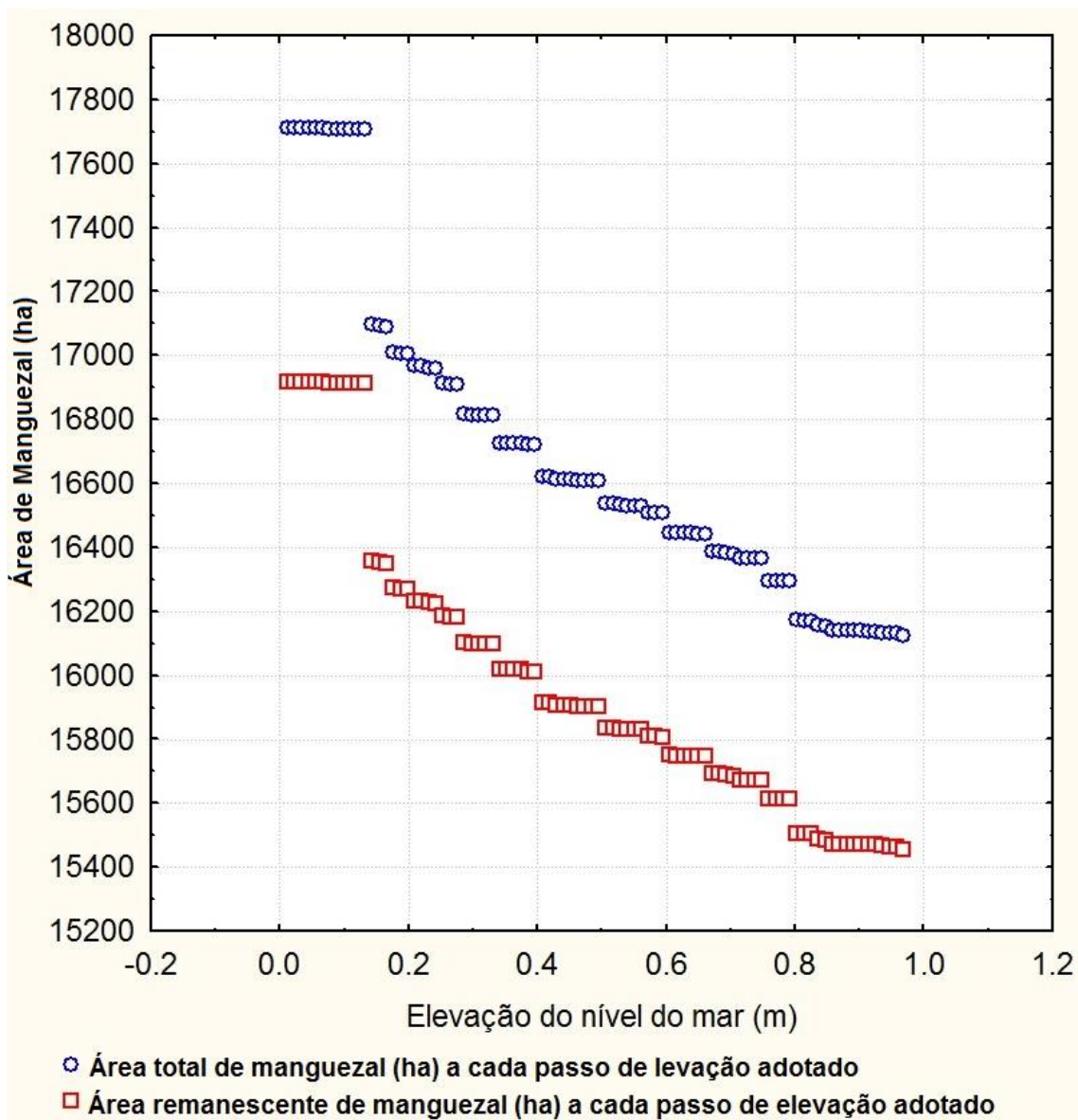


Figura 4.3 - Simulação da área remanescente de manguezal a cada passo de elevação do NMRM adotado no presente estudo.

Observadas as características geográficas e ambientais da área de estudo, um padrão inicial de resistência do manguezal à elevação do NMRM quanto à área total e remanescente foi observado para valores de elevação de 0,01 a 0,13 m, referente ao período de 2013 a 2024. Neste intervalo, a área de manguezal permaneceu aproximadamente constante, com valores da ordem de 17.711 ha para a área total, e 16.916 ha de área remanescente, o que corresponde a 4,49% (795 ha) de incremento de área, favorecendo a ampliação de manguezal com a elevação do NMRM. A partir de 0,14 m de elevação do NMRM, correspondendo ao ano de 2025, o manguezal respondeu com doze padrões subsequentes de resistência e declínio (Tabela 4.1). Os resultados simulados

do modelo para cada evento de elevação do NMRM estão apresentados no Apêndice B.

Tabela 4.1 - Padrões de resistência, declínio e expansão do manguezal em relação aos intervalos de elevação do NMRM simulados.

Período (anos)	Elevação do NMRM (m)	Área Remanescente		Área Total		
		Média (ha)	Perda (%)	Média (ha)	Perda (%)	Expansão (%)
2013 a 2024	0,01 a 0,13	16.916	(*)	17.711	(*)	4,49
2025 a 2027	0,14 a 0,17	16.353	3,33	17.092	3,50	4,32
2028 a 2030	0,18 a 0,20	16.272	3,81	17.008	3,97	4,33
2031 a 2034	0,21 a 0,24	16.229	4,06	16.964	4,22	4,33
2035 a 2037	0,25 a 0,28	16.184	4,33	16.912	4,51	4,30
2038 a 2042	0,29 a 0,33	16.100	4,82	16.814	5,06	4,25
2043 a 2048	0,34 a 0,40	16.017	5,31	16.724	5,57	4,23
2049 a 2057	0,41 a 0,50	15.906	5,97	16.613	6,20	4,26
2058 a 2066	0,51 a 0,59	15.824	6,46	16.525	6,70	4,24
2067 a 2072	0,60 a 0,66	15.750	6,89	16.445	7,15	4,23
2073 a 2080	0,67 a 0,75	15.683	7,29	16.376	7,54	4,23

Continua

Tabela 4.1 – Conclusão

Período (anos)	Elevação do NMRM (m)	Área Remanescente	Área Total	Período (anos)	Elevação do NMRM (m)	Área Remanescente
		Média (ha)	Perda (%)			Média (ha)
2081 a 2084	0,76 a 0,79	15.616	7,69	16.295	8,00	4,17
2085 a 2100	0,80 a 0,97	15.479	8,49	16.145	8,84	4,13

(*) – Valores de referência para mensuração da perda percentual das áreas remanescente e total de manguezal para a variação do NMRM de 0,14 a 97 m.

Após o intervalo de elevação do NMRM de 0,01 a 0,13 m (Tabela 6.1), os valores simulados de área total de manguezal sofreram perdas percentuais crescentes que oscilaram de 3,5%, correspondente a 619 ha, para a variação do NMRM de 0,14 a 0,17 m, a 8,84% ou 1566 ha, para a variação do NMRM de 0,80 a 0,97 m. Houve diminuição da área remanescente de manguezal com variação de 3,33%, 563 ha, para a variação do NMRM de 0,14 a 0,17 m, a 8,49% equivalente a 1437 ha, para a variação do NMRM de 0,80 a 0,97 m. Quanto à área de expansão de manguezal, resultante do processo de migração, apresentou um valor percentual com leve declínio que variou de 4,49%, no primeiro padrão de resistência, a 4,13% no último padrão de resistência.

Assim como o padrão de perda da área total de manguezal, também houve aumento dos valores de perda da área remanescente durante a simulação. Contudo, foram observados percentuais de diminuição levemente inferiores àqueles observados para a simulação da área total de manguezal (Tabela 4.1). Possivelmente, à medida que os eventos consecutivos de elevação do NMRM ocorrem, a área total de manguezal tende a diminuir em decorrência do avanço do mar (inundação e/ou erosão), ao mesmo tempo em que as barreiras naturais e antrópicas gradativamente diminuem os espaços potenciais de migração para manguezal. Por sua vez, a área remanescente é influenciada apenas pelo processo de elevação do NMRM.

Os resultados da simulação do BR-MANGUE indicam um limite de resistência do manguezal a determinadas variações de elevação do NMRM. Eventos de perdas de manguezal são compensados pelo processo de migração, o que tende a deixar a área total de manguezal praticamente estável ao longo de uma determinada variação de elevação. Porém, atingindo o seu nível de saturação, a área de manguezal apresenta certos padrões de vulnerabilidade, resultando em declínio de sua área. Estes resultados são consistentes com a literatura que indica que o manguezal pode responder à dinâmica de elevação do nível do mar (LARA; COEH, 2009; GUIMARÃES, 2010; FRANÇA, 2012). Estudos têm demonstrado que durante o Holoceno, no período pós-glacial a elevação do nível do mar e mudanças no fluxo de água dos rios se caracterizaram como as principais forças motrizes por trás da expansão / contração de áreas de manguezal no norte do Brasil (GUIMARÃES et al., 2010, SMITH et al., 2012). Neste contexto, a contribuição da presente pesquisa consiste em simular quanto de elevação do mar o ecossistema manguezal pode absorver sem causar impactos negativos ao ecossistema, ou seja, sua resistência à elevação do NMRM, levando-se em consideração também a influência de barreiras naturais e antrópicas.

A partir das oscilações de ganho e perda de áreas de manguezal obtidas (Figura 4.3 e Tabela 4.1), o modelo BR-MANGUE foi utilizado também para simular os processos de migração e restrição da área do manguezal para cada evento de elevação adotado, conforme apresentado na Figura 4.4.

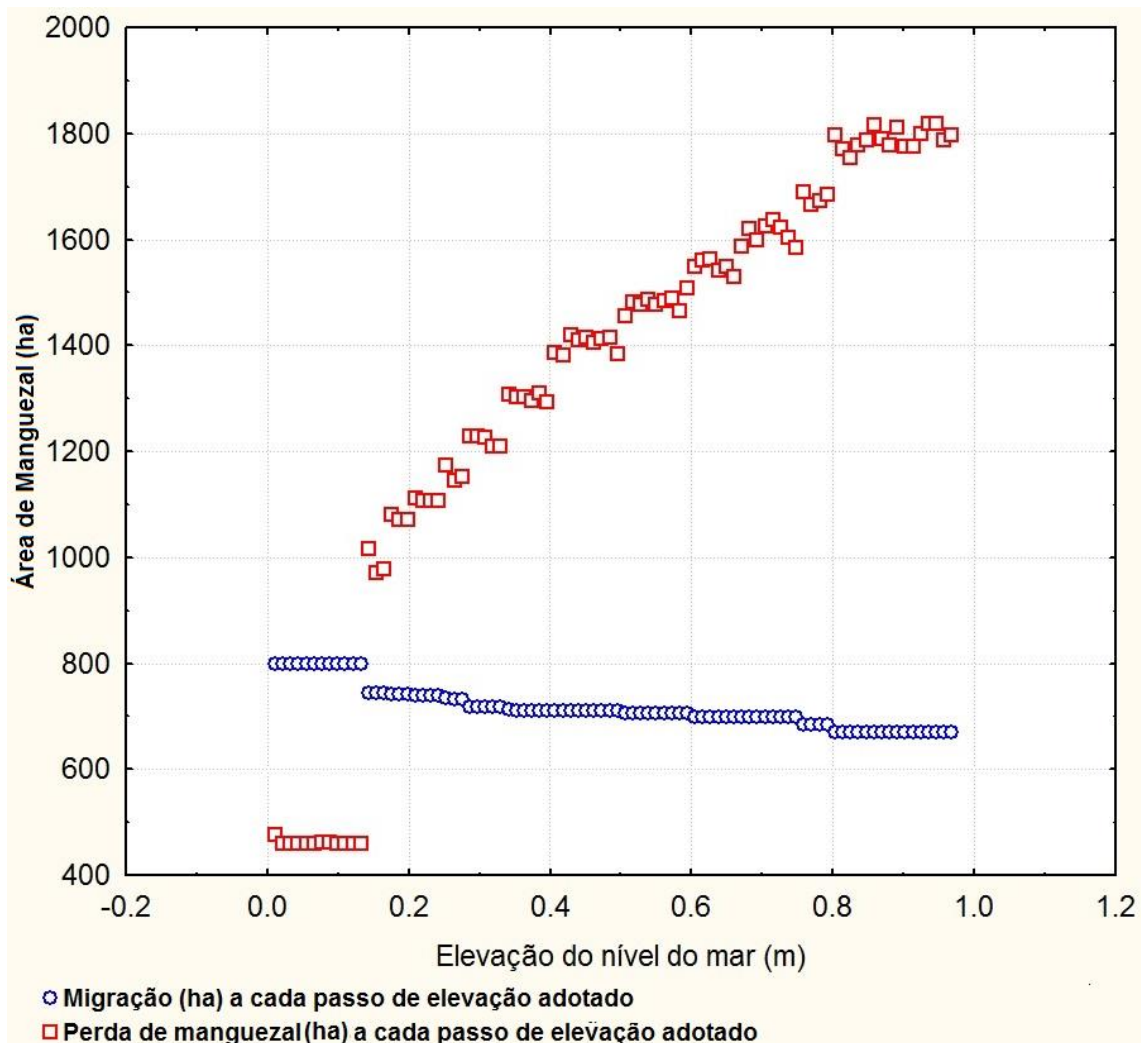


Figura 4.4 - Simulação da área perdida e migrada de manguezal a cada passo de elevação.

A migração da área de manguezal simulada apresentou dois padrões distintos: o primeiro referente ao intervalo de elevação do NMRM de 0,01 a 0,13 m, com migração de 800 ha por evento de elevação. No segundo padrão, a partir de 0,14 m de elevação do NMRM até o final da simulação, a área migrada de manguezal apresentou um suave declínio, com valor médio de 717,14 ha. Em relação à perda total de área de manguezal, obteve-se em média 462 ha para o intervalo de 0,01 a 0,13 m de elevação do NMRM. Porém, a partir de 0,14 m de elevação, o manguezal apresentou maior vulnerabilidade, uma vez que, a área perdida de manguezal variou em valores ascendentes que oscilaram de 972 a 1817 ha de perda (Figura 4.4).

Os resultados obtidos demonstram padrões de resistência e declínio do manguezal a determinados intervalos de elevação do NMRM, evidenciando o processo de expansão de manguezal (migração) mais intenso que as taxas de perdas até a elevação de 0,13 m. A partir deste valor o manguezal começa sofrer intensa redução tanto de sua área total, como da área remanescente, enquanto a área migrada apresenta leve redução e se mantém quase que constante. Outra forma de análise da dinâmica da área de manguezal simulada refere-se às taxas brutas e líquidas de perda de manguezal, permitindo quantificar os processos de perda e ganho de manguezal em intervalos de elevação do NMRM, apresentado na Tabela 4.2. Perda bruta de manguezal corresponde às perdas de área de manguezal ocasionadas pelo processo de elevação do NMRM a cada evento de elevação, já a perda líquida corresponde à área perdida de manguezal restante, mesmo quando a diminuição de área é compensada pela expansão de novas áreas de migração do ecossistema.

Tabela 4.2 - Valores de expansão de área (migração) e de perdas brutas e líquidas de manguezal por intervalos de eventos de elevação do NMRM.

Variação do NMRM (m)	Perda Bruta média (ha)	Área migrada (ha)	Perda líquida (ha)
0,01 a 0,13	462	800	-
0,14 a 17	989,33	744	245,33
0,18 a 0,20	1075	741	334
0,21 a 0,24	1108,75	740	368,75
0,25 a 0,28	1157,66	735	422,66
0,29 a 0,33	1220,60	719	501,6

Continua

Tabela 4.2 - Conclusão

Variação do NMRM (m)	Perda Bruta média (ha)	Área migrada (ha)	Perda líquida (ha)
0,34 a 0,40	1303	712	591
0,41 a 0,50	1404,11	712	692,11
0,51 a 0,59	1480,77	706	774,77
0,60 a 0,66	1549,16	700	849,16
0,67 a 0,75	1610,25	699	911,25
0,76 a 0,79	1678,50	684	994,5
0,80 a 0,97	1791,43	671	1120,4

Observa-se um salto positivo na dinâmica de área do manguezal para o intervalo de elevação do NMRM de 0,01 a 0,13 m, uma vez que a perda de área de manguezal bruta, equivalente a 462 ha, foi compensada pelo ganho em área migrada (800 ha), resultando em um ganho líquido de 338 ha. Contudo, para os intervalos de eventos subsequentes de elevação do NMRM houve saldo negativo de área que variou de 245,33 ha (intervalo de elevação de 0,14 a 0,17 m) a 1120,4 ha (intervalo de elevação de 0,80 a 0,97 m). Valores de taxas de perda líquida de manguezal superiores aos ganhos de área, observados a partir do evento de elevação de 0,14 m, devem-se provavelmente à intensidade de elevação do NMRM adotada na presente pesquisa, que é iniciada com 0,011 m e chega a 0,97 m no final da simulação.

Adicionalmente, têm-se usos antrópicos na área de estudo que constituem fatores limitantes à expansão do manguezal. Na Ilha do Maranhão, a área antrópica em 2012 correspondia a 48,77% das classes de uso e ocupação, equivalente a 43.874,81 ha, dispersas por toda ilha. Também há barreiras naturais que limitam a expansão do manguezal. Assim, de um lado o

manguezal é pressionado pelos consecutivos eventos de elevação do NMRM considerados na presente pesquisa, de outro, há presença de barreiras naturais e antrópicas que tendem a diminuir os espaços de colonização do manguezal.

Mesmo sem realizar a projeção de expansão para uso antrópico nesse primeiro exercício de modelagem, pode-se inferir que superfícies impermeáveis em áreas de solos indiscriminados de mangues, como por exemplo, em áreas de aterros (ver Figura 4.7), podem impedir o progresso do manguezal. Este efeito de barreira foi observado em áreas de manguezal circunvizinhas a áreas de uso antrópico presentes Ilha do Maranhão (Figura 4.5). O que confirma a utilidade dos experimentos de modelagem para áreas urbanizadas, para indicar as porções de manguezal com maior vulnerabilidade aos impactos do aumento do nível do mar juntamente com a influência de áreas antrópicas e barreiras naturais reduzindo a capacidade adaptativa do manguezal (CAHOON et al., 2006).

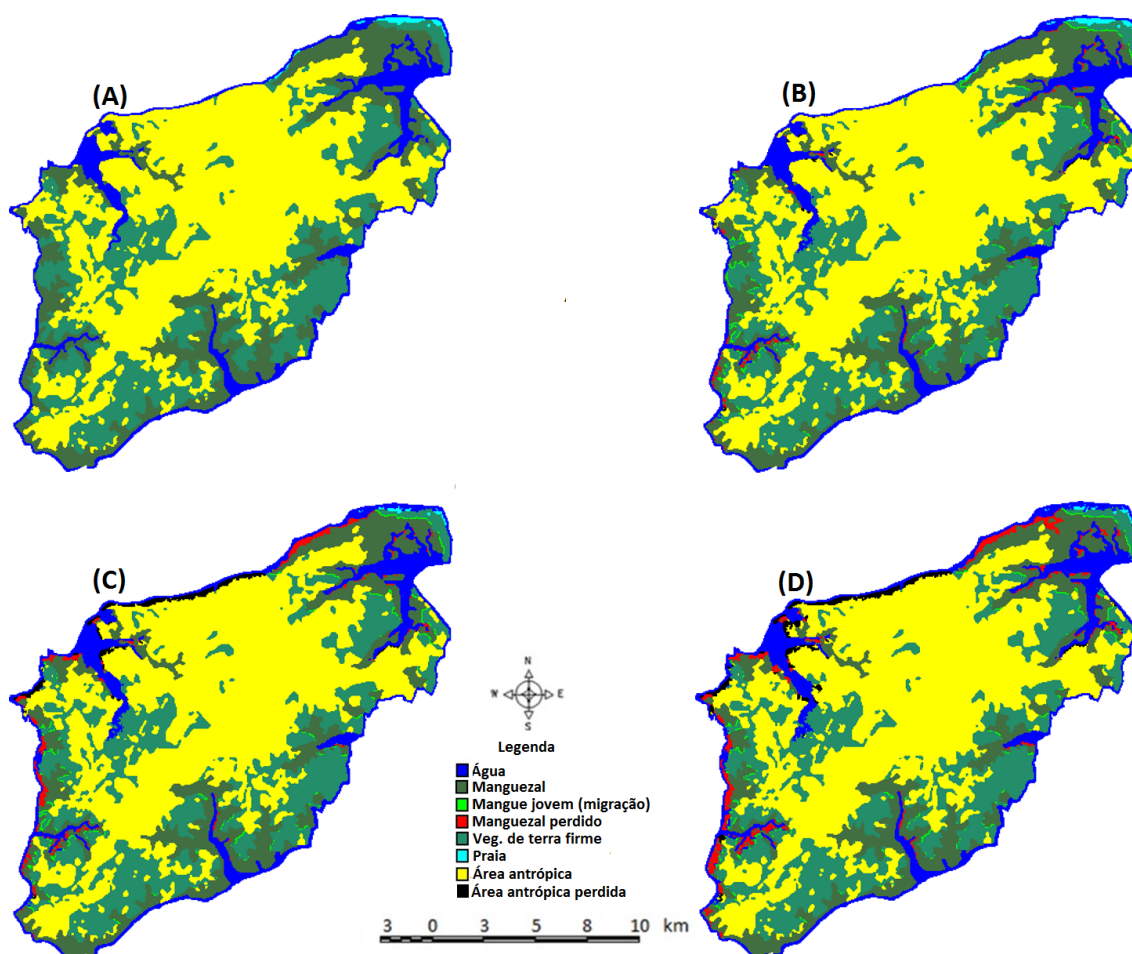


Figura 4.5 - Classes de cobertura do solo e a distribuição espacial das áreas de manguezal na Ilhado Maranhão: (A) - Situação inicial com NMRM = 0 m (2012), (B) – Simulação após NMRM de 0,011 m (2013), (C) - Simulação após NMRM de 0,178 m (2027) (D) – Simulação após NMRM de 0,97 m (2100).

Como previsto, o manguezal migrou para áreas sob pouca influência dos usos antrópicos e que apresentam condições propícias a colonização do manguezal. Contudo, nas áreas de migração do manguezal a topografia é baixa, de 0,01 a 18,60 m, e dessa forma, o processo de migração de novas áreas de manguezal foi sobreposto pela continuidade da simulação do avanço do NMRM, as áreas de manguezal menos suscetíveis a elevação do NMRM foram às localizadas mais distantes aos usos antrópicos.

Ao término da simulação, foi possível analisar que o sul e sudeste da Ilha (Figura 4.5 d) foram às regiões menos vulneráveis ao processo de elevação do NMRM adotado no presente estudo, pois apresentam uma topografia um pouco

mais elevada com valores de altimetria que podem chegar a até aproximadamente 31 m.

No Brasil, estudos que objetivam a avaliação da dinâmica de área de manguezal são voltados para uso de técnicas de sensoriamento remoto, como por exemplo, Wilson et al. (2013) que através de dados de radar mapearam a dinâmica de aumento e retração nas florestas do manguezal Amazônico, a maior área contínua de manguezal do planeta, compreendida entre o município de Belém/PA até a Ilha do Maranhão. No estudo, os autores mensuraram as variações de perdas e ganhos em área de manguezal durante o período de 1996 a 2008, sendo registradas taxas de perdas da ordem de 14% (1212,50 km²) e taxas de aumento do manguezal de 22% (1931,04 km²) no período analisado.

Outros trabalhos como Lara e Cohen (2003), Souza-Filho et al. (2005) e Batista et al. (2008) estudando o litoral Amazônico, e Drude et al. (2007) no litoral do nordeste brasileiro, apresentam procedimentos metodológicos robustos para aferição de alterações na área de manguezal nos intervalos de tempo considerados em cada pesquisa. Porém, não apresentam uma inferência metodológica específica para relacionar os processos de perda ou expansão da área de manguezal diretamente a eventos de elevação do NMRM relacionados a mudanças climáticas. As causas para as alterações de área de manguezal mencionadas estão ligadas à dinâmica costeira (erosão, progradação, etc.) e à influência de uso e ocupação do solo. Drude et al. (2007) indicam que parte desta lacuna deve-se à inexistência de um referencial altimétrico ortométrico no Brasil para a zona costeira como um todo e a carência de dados históricos de nível do mar que permitam estabelecer taxas específicas de elevação para todo o litoral brasileiro.

O principal “*drive force*” (forçante) de alteração de áreas de manguezal na área de estudo é a urbanização, pois, parte significativa da Ilha do Maranhão foi urbanizada através de aterro de manguezal, processo iniciado desde a década de 1970 (TROVÃO, 1994; BEZERRA, 2008). IMESC (2011) utilizando técnicas de sensoriamento remoto e comparando os resultados obtidos com o estudo realizado por SEMA (1993), indica que durante o intervalo de tempo

compreendido entre 1973 a 2008 (Figura 4.6), a área de manguezal na Ilha do Maranhão diminuiu de 158 km² para 105 km², em decorrência de atividades de aterro e em 17 anos houve uma perda equivalente a mais de 30% (IMESC, 2003).

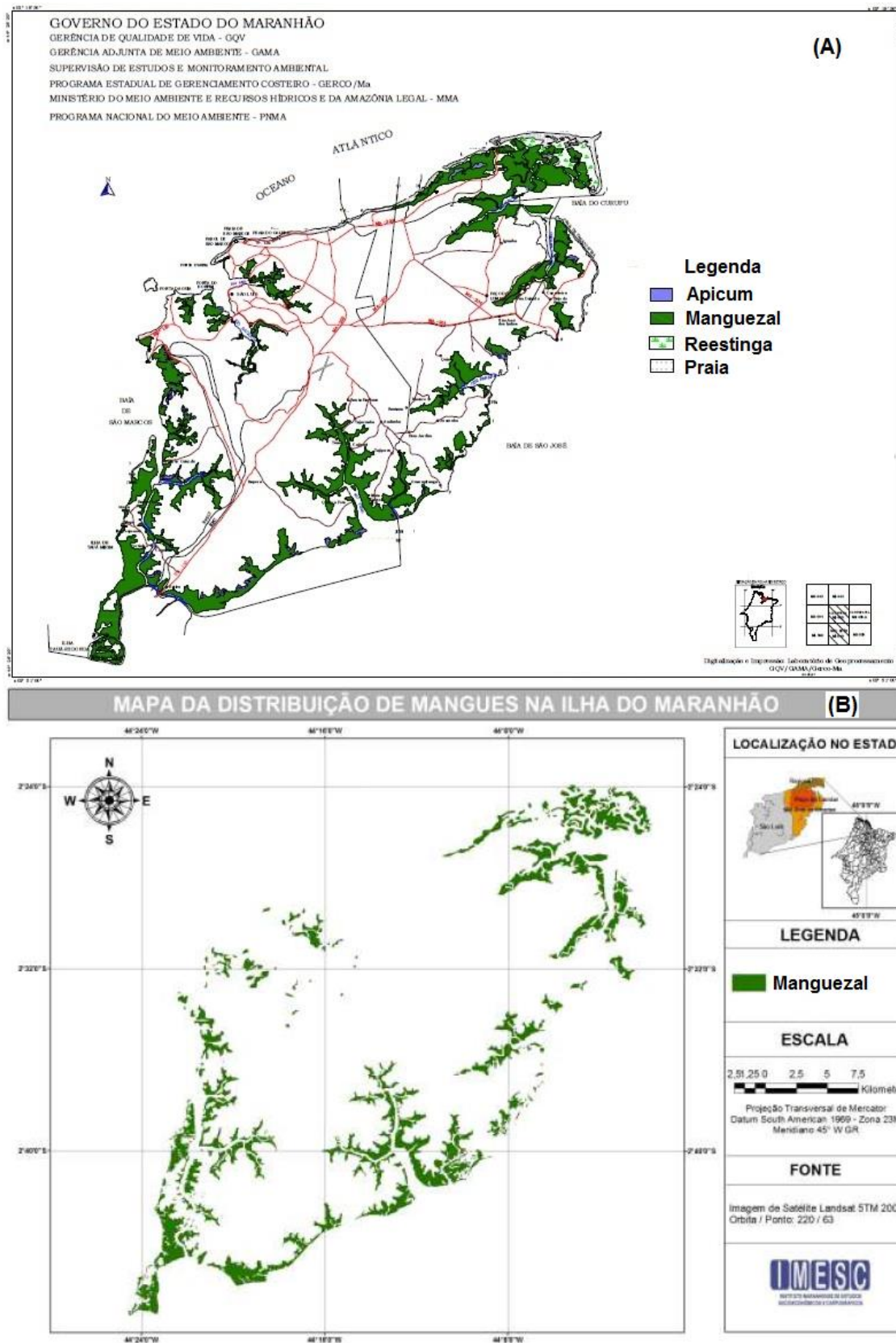


Figura 4.6 – Mudanças nas florestas de manguezal presentes na Ilha do Maranhão durante 1993 (A) a 2008 (B).
Fonte: IMESC (2011)

IMESC (2011) menciona ainda que o processo de perda de áreas de manguezal na Ilha pode ser entendido através da dinâmica de crescimento populacional e pela expansão do setor imobiliário dos municípios da Ilha. No período supracitado de 1993 a 2008, os municípios da Ilha sofreram perdas percentuais da ordem de: São Luís houve uma diminuição de mais de 25%; nos municípios de São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa, foram visualizadas perdas de aproximadamente 52%, 64% e 60% respectivamente. A Figura 4.7 apresenta um exemplo de áreas de manguezal que foram convertidas em aterro na Ilha do Maranhão, durante o intervalo de tempo compreendido entre 1975 a 2001.

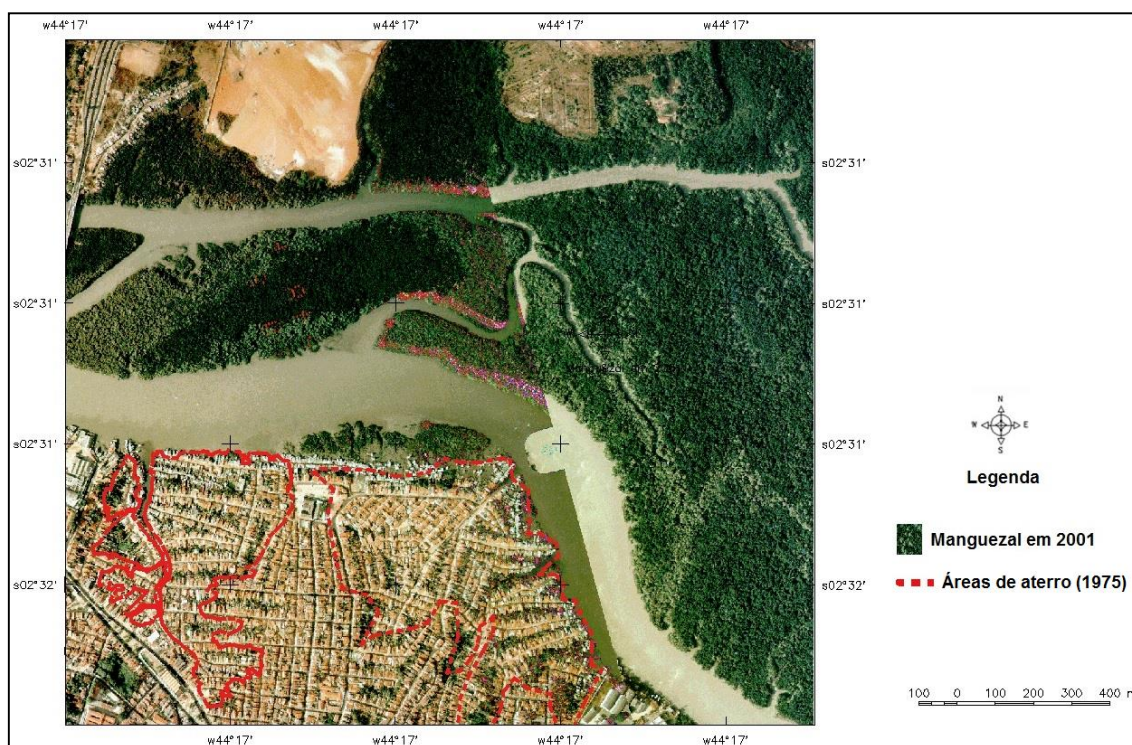


Figura 4.7 – Exemplo de aterro de manguezal na Ilha do Maranhão durante 1975 a 2001.

Fonte: adaptado de Bezerra (2008).

Os dados obtidos por meio das simulações realizadas com o BR-MANGUE levam em consideração como única força motriz de alteração na área do manguezal, a elevação do nível do mar e não a expansão da área urbanizada. Assim, não foi possível comparar os resultados da presente pesquisa, com os dados apresentados pela literatura citada.

O exercício de modelagem e simulação do BR-MANGUE identificou também as áreas antrópicas que podem ser afetadas por potenciais eventos de elevação do NMRM na área de estudo (Figura 4.5). As perdas de áreas antrópicas por "inundação e/ou erosão" variaram de 123 a 1.163 ha no decorrer do processo de simulação, conforme resultados completos apresentados no Apêndice B. A identificação de áreas antrópicas vulneráveis à elevação do NMRM pode ser justificada pela baixa topografia da Ilha do Maranhão (por volta de 60 m) e pela existência das áreas de aterro de manguezal.

As áreas que no início da simulação em 2012 eram ocupadas por usos antrópicos (casas, ruas, solo exposto, etc.), mas que outrora tais áreas eram ocupadas pelo manguezal e conseqüentemente estavam sujeitas a influência da AIM, e dessa forma, caso haja elevação do mar, tais áreas podem voltar a serem atingidas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O manguezal é um ecossistema costeiro vulnerável ao processo de elevação do nível do mar, devido à sua localização entre o mar e o continente. No Brasil há um grande desafio no que tange o entendimento do padrão de resposta do manguezal a possíveis cenários de elevação do mar, uma vez que a maior área contínua de manguezal do planeta, situada no perímetro da Amazônia Legal brasileira, encontra-se no litoral brasileiro, assim como, também, devido a pouca produção científica brasileira voltada para a antecipação e prevenção dos potenciais impactos do aumento do nível do mar. A presente pesquisa objetivou-se a apresentar uma proposta metodológica voltada a modelagem computacional direcionada ao entendimento da dinâmica do manguezal frente a eventuais cenários de elevação, como um elemento a mais para a discussão dos possíveis padrões de respostas do manguezal.

O modelo desenvolvido foi intitulado de BR-MANGUE e os resultados obtidos através do mesmo, corroboram com a hipótese do presente estudo, pois foi possível identificar a capacidade de resistência do manguezal a elevação do NMRM, que correspondeu a uma variação de aproximadamente 0,01 a 0,13 m. Neste intervalo de elevação do NMRM, a área de manguezal total e remanescente permaneceu aproximadamente constante, com 17.711 e 16.916 ha, respectivamente, ou seja, com taxas de perda e ganho constates e equivalentes.

Para valores de elevação do NMRM a partir de 0, 14 m, o manguezal apresentou um decréscimo da área ocupada, que foi caracterizado por doze padrões subsequentes de resistência e declínio de área, o que pode evidenciar a complexidade da resposta do manguezal à elevação do NMRM em locais sob influência de uso e ocupação antrópica como ocorre na área de estudo. Também foi possível monitorar os padrões de migração e perda do manguezal por cada evento de elevação adotado, além da intensidade das taxas líquidas de perda, que variaram de 0 a 1.120,4 ha no decorrer da simulação.

O BR-MANGUE também foi testado para a identificação espacial de áreas com diferentes níveis de vulnerabilidade aos eventos de elevação do mar adotados

no presente estudo, fato que pode auxiliar em possíveis intervenções de mitigação e/ou adaptação para o manguezal na área de estudo.

Por meio dos resultados simulados, é possível inferir que o padrão de resposta do manguezal à elevação do NMRM é dependente das características geográficas locais da área ocupada pelo manguezal, e das áreas adjacentes, além das taxas de elevação. Assim, tornar-se pouco provável que seja possível simular os impactos das mudanças climáticas para a zona costeira brasileira como um todo, sendo necessária a realização de estudos regionais.

Na zona costeira brasileira, experimentos de modelagem podem ser utilizados no auxílio à tomada de decisão e na formação de medidas de mitigação às mudanças climáticas, através de instrumentos de gestão do parcelamento do solo já em uso pela legislação vigente, tais como: plano diretor dos municípios, zoneamento costeiro e zoneamento ecológico econômico.

E por fim, os resultados obtidos por meio do BR-MANGUE sugerem que experimentos de modelagem podem ser usados para promover uma melhor compreensão dos padrões de respostas do manguezal a potenciais eventos de elevação do nível do mar, principalmente em áreas de uso e ocupação complexos como na zona costeira brasileira.

5.1 Recomendações

- Realização de mais estudos envolvendo experimentos de modelagem nos manguezais do Brasil em termos de suas potenciais respostas às mudanças climáticas, e que estes sejam parametrizados com dados provenientes de pesquisas de campo (dados de estrutura de mangues).
- A utilização de experimentos de modelagem devem ser utilizados não apenas no que tange a resposta do manguezal como ecossistema em sim, mas também, para simulação das possíveis alterações em sua capacidade de fornecer bens e serviços ambientais à zona costeira.
- Implementação e avaliação continuada do Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), principalmente para atividade de

monitoramento da perda de áreas de manguezal e de seus bens e serviços.

- Implementação e consolidação de Áreas Marinhas Protegidas, especialmente aquelas circunvizinhas a locais sob forte influência da pressão imobiliária e que detenham comprovada importância ambiental e em termos de biodiversidade.
- Estabelecimento de um referencial altimétrico ortométrico por compartimento da zona costeira brasileira.
- Criação de um banco de dados para acompanhamento do nível do mar, para a obtenção de séries históricas que permitam estabelecer taxas de elevação do nível do mar para o litoral brasileiro como um todo ou por compartimentos deste.
- Produção de dados de desflorestamento/aterro de manguezal para todo o Brasil pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).
- Nos relatórios do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas sejam apresentadas simulações de experimentos computacionais para acompanhamento da dinâmica de resposta do manguezal e demais ecossistemas costeiros às mudanças climáticas em território nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB´SABER, A. N. Contribuição à geomorfologia do Estado do Maranhão. *Notícia Geomorfológica*. Campinas, v. 3, n. 5, p. 35-45, abr., 1960.
- AGEDI. *Building blue carbon projects - an introductory guide*. AGEDI/EAD. Published by AGEDI. Produced by GRID-Arendal, A Centre Collaborating with UNEP, Norway, 2014.
- AGRAWALA, S. et al. *Development and climate change In Fiji: Focus on Coastal Mangroves*. COM/ENV/EPOC/DCD/DAC, 56 p, 2003.
- AIZPURU, M.; ACHARD, F.; BLASCO, F. *Global assessment of cover change of the mangrove forests using satellite imagery at medium to high resolution*. – Joint Research center, Ispra, 2000. EEC Research project n 15017-1999-05 FIED ISP FR.
- ALONGI, D.M. Resilience of mangrove forests, tsunamis, and global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 76, n. 1, Publisher Elsevier, p. 1-13, 2008. doi:10.1016/j.ecss.2008.08.024.
- BATISTA, E.M. et al. Avaliação de áreas deposicionais e erosivas em cabos lamosos da zona Costeira Amazônica através da análise multitemporal de imagens de sensores remotos. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 27 (supl.1): p. 83-86, 2009. doi.org/10.1590/S0102-261X2006000300005
- BERGER, U. et al. Advances and limitations of individual-based models to analyze and predict dynamics of mangrove forests, *Aquat. Bot*, 2008. doi:10.1016/j.aquabot.2007.12.015.
- BERGER, U. et al. Modelling secondary succession of neotropical mangroves: causes and consequences of growth reduction in pioneer species. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematic*. v. 7, p. 243-252. doi:10.1016/j.ppees.2005.08.001, 2006
- BERGER, U.; Hildenbrandt, H. A New approach to spatially explicit modelling of forest dynamics: spacing, ageing and neighborhood competition of mangrove trees. *Ecological Modelling*. V.132, p. p. 287–302, 2000.
- BEZERRA, D. S. *O ecossistema manguezal em meio urbano no contexto de políticas públicas de uso e ocupação do solo na bacia do rio Anil, São Luís-MA*. 2008. 122p. Dissertação (Mestrado em Saúde e Ambiente) - Universidade Federal do Maranhão (UFMA), 2008.
- BEZERRA, D. S.; AMARAL, S.; KAMEPL, M. Impactos da elevação do nível médio do mar sobre o ecossistema manguezal: a contribuição do sensoriamento remoto e modelos computacionais. *Ciência e Natura*. ISSN: 2179-460X, v. 35 n. 2 Dez. 2013, p. 152-162, 2013.
- BLASCO, F.; SAENGER, P.; JANODET, E. Mangroves as indicators of coastal change. *Catena*, v. 27, n. 3-4, p. 167-178, 1996.

BOUILLION, S. et al. Mangroves. *The Management of natural coastal carbon sinks*. D. d. A. Laffoley and G. Grimsditch. Gland Switzerland, IUCN: p. 13–20. 2009.

BRADLEY, B. W. et al. Ethnobiology, Socio-economics and Management of Mangrove Forests: A review. *Aquatic Botany*, v. 89: p. 220–236, 2008. doi:10.1016/0304-3770(75)90002-9

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). *Mapeamento dos manguezais brasileiros*. Disponível em: <<http://siscom.ibama.gov.br/sitecsr/index.php?page=zona-costeira>>. Acesso em: 23 jul. 2012.

BRIDGHAM, S. D. The Carbon Balance of North American wetlands. *Wetlands*, v. 26, n. 4, p. 889–916, 2006.

CAHOON, D.R. et al. Coastal wetland vulnerability to relative sea-level rise: wetland elevation trends and process controls. In: VHOEVEBN J.T.A. et al. (Eds.), *Wetlands and Natural Resource Management*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. v. 190, p. 271–292. Ecological Studies

CARNEIRO, T. G. S. et al. TerraME: an extensible toolbox for modeling nature-society interactions. *Environmental Modelling & Software*, v. 46 p. 104-117, 2013.

CITRÓN, G. et al. Mangrove in arid environments in Puerto Rico and adjacent Islands *Biotropica*, v.10, p. 110-121, 1978.

CHMURA, G.L. et al. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles*, v.17, p.4, p. 1-12, 2003.

CLOUGH, J.E. et al. Estimating leaf area index and photosynthetic production in canopies of the mangrove *Rhizophora apiculata* Mar. *Ecol. Progr. Ser.*, v.159, p. 285–292, 1997.

COHEN, M. C. L.; LARA, R. J. Temporal changes of mangroves vegetation boundaries in Amazonia: application of GIS and remote sensing techniques. *Wetl. Ecol. Manage*, 11, p. 223–231, 2003.

COPERTINO, M. S. et al. Introduction to the special volume on climate changes and Brazilian Coastal Zones. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, v.52, n.3, p. i-vi., 2010.

COPERTINO, M.S. Add coastal vegetation to climate critical list. *Nature*, 19 May, v. 473, p. 225, 2011.

COSTANZA, R. et al. The valuation and management of wetland ecosystems *Ecol. Econ.*, v.1, p. 335–36, 1989. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam - Printed in The Netherlands.

DAHDOUH-GUEDAS, F. et al. How effective were mangroves as a defense against the recent tsunami? *Curr. Biol.*, v.15, p. 443–447, 2005.

DAVIES, J. L. A morphogenic approach to world shorelines. *Zeit. f. Geomorph.*, v. 8, p. 27-142, 1964.

DEANGELIS, D.L.; MOOIJ, W.M. Individual-based modeling of ecological and evolutionary processes. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* v.36, p. 147–168, 2005.

DI NITTO, D. et al. Mangroves facing climate change: landward migration potential in response to projected scenarios of sea level rise, *Biogeosciences Discuss.*, v.10, p. 3523-3558, doi:10.5194/bgd-10-3523-2013, 2013.

DOYLE et al. Predicting the retreat and migration of tidal forests along the northern Gulf of Mexico under sea-level rise. *Forest Ecology and Management*, v. 259, p. 770–777, 2010.

DOYLE, T. W.; GIROD, G. F. The frequency and intensity of Atlantic hurricanes and their influence on the structure of south Florida mangrove communities. In: H. DIAZ & R. PULWARTY (eds). *Hurricanes, climatic change and socioeconomic impacts: a current perspective*. New York: Westview Press, 1996.

DOYLE, T. W.; GIROD, G. F.; BOOKS, M. A. Chapter 12: modeling mangrove forest migration along the southwest coast of Florida under climate change. In: NING, Z.H., TURNER, R.E., DOYLE, T.W., ABDOLLAHI, K. (Eds.), *Integrated assessment of the climate change impacts on the Gulf Coast region*. Baton Rouge, LA: GRCCC and LSU Graphic Services, 2003. p. 211-221.

DUARTE, C. M.; MIDDELBURG, J. J.; CARACO, N. Major Role of Marine Vegetation on the Oceanic Carbon Cycle. *Biogeosciences*, v. 2, p. 1-8, 2005.

ELLISON, J. C. Mangrove retreat with rising sea-level, Bermuda. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, v.37, n. 1, p. 75-87, 1993.

EMBRAPA - MONITORAMENTO POR SATÉLITE (Campinas, SP). *Zoneamento ecológico-econômico do Estado do Maranhão: pedologia*. Campinas. CD-ROM. Escala 1:500.000; Formato: Arquivo de Impressão (PRT); Projeções: UTM. (ZEEMA/02/053, Pedologia), 2002.

ERFTEMEIJER, P.L.A. A new technique for rapid assessment of mangrove degradation: A case study of shrimp farm encroachment in Thailand. *Trees – Structure and Function*, v.16, p. 204–208, 2002.

ESPINOSA, L. Y.; FLORES, J. A Review of sea-level rise effect on mangrove forest species: anatomical and morphological modifications. In: CASALEGNO, S. (ed). *Global warming impacts – case studies on the economy, human health, and on urban and natural environments*. Rijeka, Croatia: Published by InTech Janeza Trdine 9, 51000. p. 253-276. ISBN 978-953-307-785-7.

FAO, UNEP. *Los recursos forestales de la America Tropical. proyecto de evaluación de los recursos forestales tropicales* (en el marco de SINUVIMA). Rome: FAO, UNEP, 1981. 349 p.

FAO. *The world's mangroves 1980-2005*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007. ISBN: 978-92-5-105856-5.

FARACO, L. F. D.; ANGRETO-FILHO, J. M.; LANA, P. C. Methodology for Assessing the vulnerability of mangroves and fisherfolk to climate change. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, v. 5, n. 2, p. 205-223, 2010.

FATOYINBO, T. E. et al. Landscape-scale extent, height, biomass, and carbon estimation of Mozambique's mangroves forests with Landsat EMT+ and Shuttle Radar Topography Mission elevation data. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, 2008. G02S06, doi:10.1029/2007JG000551.

FEITOSA, A. C. A Zona costeira e o litoral na Ilha do Maranhão, Estado do Maranhão - Brasil. *Encuentro de Geógrafos de América Latina*, Perú de 08 a 13 de abril de 2013. 12 p.

FERREIRA, H. O. Contribuição ao estudo das correntes de maré dos estreitos dos coqueiros e mosquitos, Maranhão. *Boletim LaboHidro*, v. 8, p. p. 45-59, 1988.

FIELD, C. Impacts of expected climate change on mangroves. *Hydrobiologia* 295, p. 75-81, 1995.

FRANÇA, M. C et al. The last mangroves Marajó Island-Eastern Amazon: Impact of climate change and/or relative sea-level changes. *Review of Palaeobotany and Palynology*, v. 187, p. 50-65, 2012.

GILMAN, E. H., ELLISON, J. e COLEMAN, R. Assessment of mangrove response to projected relative sea-level rise and recent historical reconstruction of shoreline position. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 124, n. 1-3, p. 105-130, 2007.

GILMAN, E. L. et al. Threats to mangroves from climate change and adaptation options, *Aquat. Bot.*, v. 89, p. 237-250, 2008.
doi:10.1016/j.aquabot.2007.12.009.

GIRI, C. et al. Status and distribution of mangrove forests of the world using observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, v. 20, p. 154-159, 2011. doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x.

GRIMM, V. Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future? *Ecol. Model.* v.115, p. 129-148, 1999.

GUIMARÃES, J. et al. Model of wetland development of the Amapá coast during the late Holocene. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 82, p. 451-465, 2010.

HERTZ, R. *Manguezais do Brasil*. São Paulo: Inst. Ocean. Universidade de São Paulo, 1991. 227 p.

HUSRIN, S., STRUSINSKA, A.; OUMERACI, H. Experimental study on tsunami attenuation by mangrove forest. *Earth Planets Space*, v.64, p. 973-989, 2012.
doi:10.5047/eps.2011.11.008

HUTCHINGS, P.; SAENGER, P. *Ecology of mangroves*. Queensland (Australia): University of Queensland Press, 1987.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) –. 2010. *Censo Demográfico*. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 23 de jun. 2013.

INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS (IMESC). *Situação ambiental da ilha do maranhão/ instituto maranhense de estudos socioeconômicos e cartográficos*. São Luís: IMESC, 2011. 57p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). *TerraView Software copyright* © 2001-2011 INPE, Tecgraf PUC-Rio and FUNCATE, 2011. IPCC. The Scientific Basis-Contribution of Working Group I to the IPCC Third Assessment Report. Cambridge Univ. Press. 2001.

IPCC. *Working group I contribution to the IPCC fifth assessment Report (AR5), climate change 2013: the physical science basis*. Cambridge Univ. Press, 2013. 2216p.

IPCC: *Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. In: PARRY, M.L.; CANZIANI, O. F.; PALUTIKOF, J. P.; VAN der LINDEN, P. J.; HANSON, C. E. (Eds). Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. 976p.

IUNC. *Are the mangroves for the future?* empirical evidence of the value of mangrove ecosystem as the basis for investments. 2005. 35 p.

KJERFVE, B et al. Morphodynamics of muddy environments along the Atlantic coasts of North and South America. In: *Muddy coasts of the world: Processes, deposits and functions*. 1st ed., Amsterdam, Elsevier Science. p. 479-532, 2002.

KJERFVE, B.; LACERDA, L. D. Mangroves of Brazil. In: LACERDA, L. D. *Conservation and sustainable utilization of mangrove forests in Latin America and Africa regions*. Okinawa, Japan, 1993. 272 p. v. 2 Part I- Latin America. p. 245-272. Mangrove Ecosystems technical reports ITTO/ISME Project PD114/90 (F).

KEUNZER, C. et al. (2011). Remote sensing of mangrove ecosystems: A Review. *Remote Sens.* 3, p. 878-928, 2011. doi:10.3390/rs3050878

LACERDA, L. D. et al. Changes in mangrove extension at the Pacoti River estuary, CE, NE Brazil due to regional environmental changes between 1958 and 2004. *Biota Neotropica*, v.7, n. 3, p. 067-072, 2007.

LAFFOLEY, D. d'A.; GRIMSDITCH, G. (eds). *Mangroves - the management of natural coastal carbon sinks*. Gland Switzerland: IUCN: 2009. 53 p.

LARA, R. J.; COHEN, M. C. L. Sensoriamento remoto. In: MARCUS, E. B. F. (org). *Os manguezais da costa Norte Brasileira*. 1^a ed. Maranhão: Fundação Rio Bacanga, p.13-30, 2003.

SANTOS, L., et al. (2011). A susceptible-infected model for exploring the effects of neighborhood structures on epidemic processes – a segregation analysis. In:

GEOINFO, 12., 2011, Campos do Jordão. *Proceedings...* Campos do Jordão, Brazil, 2011. p 85-96.

LOVELOCK, C. E.; ELLISON, J. C. Vulnerability of mangroves and tidal wetlands of the great barrier reef to climate change. In: JOHNSON, J.E., MARSHALL, P.A. (Eds.). *Climate change and the great barrier reef: a vulnerability assessment*. Australia: Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, 2007. p. 237–269.

LUGO, A. E.; SNEDAKER, S.C. The ecology of mangroves. *Annual Review of Ecology and Systematics*, v.. 5, p. 39-64, 1974.

MCLEOD, E.; SALM, R. V. *Managing mangroves for resilience to climate change*. Gland, Switzerland: IUNC, 2006. 64 p.

MIRANDA, E. E. (Coord.). *Brasil em relevo*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Acessível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 5 abr. 2013.

MIRANDA, L. B., CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. *Princípios de oceanografia física de estuários*. – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002. 411 p.

MUEHE, D. Brazilian coastal vulnerability to climate change. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, v. 5, n. 2, p. 173-183, 2010.

MURRAY, B.C. et al. *Payments for blue carbon*: potential for protecting threatened coastal habitats. Nicolas Institute Policy Brief, 2010. 8 p. Disponível em: <<http://nicholasinstitute.duke.edu/oceans/marineees/blue-carbon>>. Acesso em: 10 jul. 2013.

NELLMANN, C. et al. (Eds). *Blue carbon*. a rapid response assessment, united nations environment programme. GRID-Arendal, 2009. ISBN: 978-82-7701-060-1, www.grida.no.

NICOLODI, J. L.; PETERMANN, R. M. Potencial vulnerability of the Brazilian coastal zone in its environmental, social, and technological aspects. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*. v.5, n. 2, p. 184-204, 2010.

NOBRE, C. A (Coord). *Relatório de atividades* - Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas. (2010-2011), 2011. 96 p.

ONG, J.E. Mangroves-a carbon source and sink. *Chemosph*. v. 27, p. 1097-1107, 1993.

ONG, J.E. *The hidden costs of mangrove services*: use of mangroves for shrimp aquaculture. international science roundtable for the media – 4 June 2002, Bali, Indonesia. Joint event of ICSU, IGBP, IHDP, WCRP, DIVERSITAS, START. Disponível em: <<http://mangroveactionproject.org/files/resources/Mangrove%20Carbon%20Sink%20Ong.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2011.

PBMC: *Sumario executivo do volume 1* – base científica das mudanças climáticas. contribuição do grupo de trabalho 1 para o 1o Relatório de

Avaliação Nacional do Paineiro Brasileiro de Mudanças Climáticas. Volume Especial para a Rio+20. Rio de Janeiro, Brasil, PBMC 2012. 34 p.

PIAU, C. et al. Simulating cryptic movements of a mangrove crab: Recovery phenomena after small scale fishery. *Ecological modelling*, v. 205, p. 110-122, 2007.

REBELO-MOCHEL, F. Visão da importância global dos manguezais amazônicos. In: ENCONTRO REGIONAL NORTE DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL EM ÁREAS DE MANGUEZAIS (ENEREAM): TRANSFORMANGUE, SABERES E PODERES, 2., 2003, São Luis-MA. Palestra Proferida durante o II Encontro Regional Norte de Educação Ambiental em Áreas de Manguezal. Relatório do Encontro. São Luís, 2003.

REBELO-MOCHEL, F; CASTRO, A. C. L. *Zoneamento costeiro do Estado do Maranhão*. São Luis: Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), 2003. CD-ROOM.

REFSGAARD, J. C. et al. An integrated model for the Danubian lowland – methodology and applications. *Water Resources Management*, Dordrecht, n. 12, p. 433-465, 1998.

ROBERTSON, A. I.; PHILLIPS, M. J. Mangroves as filters of shrimp pond effluents: predictions and biogeochemical research needs, *Hydrobiologia*, v. 295: p. 311-321, 1995.

RÖNNBÄCK, P. The Ecological basis for economic value of seafood production supported by mangroves ecosystems. *Ecological Economics*, v. 29: p. 235-252, 1999.

RUIZ-LUNA, A.; BERLANGA-ROBLES, C. A. Land use, land cover changes and coastal lagoon surface reduction associated with urban growth in Northwest Mexico. *Landscape Ecology*, v. 18: p. 159–171, 2003.

SCAVIA, D. et al. Climate change impacts on mangroves U.S. coastal and marine ecosystems. *Estuaries*, v. 25: p.149-164, 2002.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. et al. Brazil mangroves. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, v. 3, n. 4, p. 561-570, 2000.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; CINTRÓN-MOLERO, G. SOARES, M. L. G. Mangroves as indicators of sea-level change in the muddy coasts of the world. In: WANG, Y.; HEALY, T. (eds.), *Muddy coasts*. London: Elsevier, 2002. p. 245-262.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; COELHO, J. R, C.; TOGNELLA-DE-ROSA, M. *Manguezais*. 1. ed. São Paulo: Ática, 2004.

SILVA JUNIOR, M. G. et al. Relação peso-comprimento de espécies de peixes do Estuário do Rio Paciência da Ilha do Maranhão, Brasil. *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*, v. 20, p. 31-38, 2007.

SMITH, C. B. et al. Holocenic proxies of sedimentary organic matter and the evolution of Lake Arari- Northern Brazil. *Catena*, v. 90, p. 26-38, 2012.

SOARES, M. L. G. A conceptual model for responses of mangrove forest to sea level rise. *Journal of Coastal Research*, especial issue, p. 267-271, 2009.

SOLOMON, S. et al. (Eds.), *Climate change: the physical science basis*. contribution of working group i to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, , 2007.

SOLOMON, S. et al. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proct. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* v.106, n. 6, p. 1704-1709, 2009.

SOUZA, M. T. R. O Litoral Brasileiro. *R. Cult.: R. IMAE*, São Paulo, v..5, n. 11, p. 63-67, jan./jun. 2004.

SOUZA, C. G. A erosão costeira e os desafios da gestão costeira no Brasil. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, v.9, n.1, p. 17-37, 2009.

SOUZA-FILHO, P.W.M.S. Costa de macromaré da Amazônia: Cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 4, p. 427-435, 2005.

SPALDING, M. D.; BLASCO, F.; FIELD, C. D. (Eds). *World mangrove Atlas*. The International Society for Mangrove Ecosystems, Okinawa, Japan, 1997. 178 p.

SPALDING, M.; KAINUMA, M.; COLLINS, L. *World mangrove atlas*. London, Washington D. C., 2010. 319 p. ISBN 978-1-84407-657-4.

TROVÃO, J. R. *Transformações sociais e econômicas no Espaço rural da Ilha do Maranhão*. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1994.

THOMAS, J. et al. Cumulative impacts of hurricanes on florida mangrove ecosystems: sediment deposition, storm surges and vegetation. *The Society of Wetland Scientists*, v. 29, n. 1, p. 24-34, 2009.

UNEP. *Assessment and monitoring of climatic change impacts on mangrove ecosystems*. UNEP Regional Seas Reports and Studies, 1994. Report nº. 154

UNEP-WCMC. *In the front line: shoreline protection and other ecosystem services from mangroves and coral reefs*. Cambridge, UK: United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre, 2006. 36 p.

UNESCO. Coastal systems studies and sustainable development. In: COMAR INTERREGIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE, UNESCO, Paris, 21-25 May, 1991. Proceedings... Paris: UNESCO, 1992. 276 p.

VALIELA, I. Mangroves Forest: One of the World's threatened major tropical environments. *BioScience*, v. 51, n. 10, p. 807-815, 2001.

VITAL, H. et al. Carta sedimentologia da plataforma continental brasileira – Área Guamaré A Macau (Ne Brasil), utilizando integração de dados geológicos

e sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 3, p. 233-241, 2005.

WALSH, G.E. Mangroves: a review. In: Reimold, R.J.; Queen, W.H. (eds). *Ecology of halophytes*. New York: Academic Press, 1974. p. 51–174.

WCMC. *Biodiversity Conservation in the tropics: gaps in habitat protection and funding priorities*. Compiled for the WWF "Forests for Life" campaign by the World Conservation Monitoring Centre, Cambridge, UK. 1995. Disponível em: http://www.unep-wcmc.org/index.html?http://www.unep-wcmc.org/resources/publications/biodiv_series.htm~main. Acesso em: 12 jan. 2014.

WILSON, R. et al. Mapping changes in the largest continuous Amazonian mangrove belt using object-based classification of multisensor satellite imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 117, p. 83-93, 2013.

WOLFF, M.; KOCH, V.; ISAAC, V. Trophic flow model of the Caete's Mangrove Estuary (North Brazil) with considerations for the sustainable use of its resources estuarine. *Coastal and Shelf Science*, v.50, p. 789–803, 2000.

WOLFRAM, S. Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of Modern Physics*, v. 55, n. 3, July, 1983.

APÊNDICE A - CÓDIGO DO MODELO EM LINGUAGEM LUA

```

1 -- Sea-Level Rise Impacts on Mangrove Ecosystem
2 -- Case Study: Maranhão Island
3 -- Authors: Denilson da Silva Bezerra, Silvana Amaral, Milton Kampel, Pedro Ribeiro de Andrade
4 -- Project funded by CAPES
5 --
6 -- Cell States and Cell attributes
7 SEE = 0
8 MANGROVE = 1
9 ANTHROPIC_AREA = 3
10 ANTHROPIC_AREA2 = 8
11 TERRESTRIAL_VEGETATION = 4
12 MANGROVE_SOIL = 4
13 MANGROVE_SOIL2 = 7
14 BEACH = 2
15 CHANNEL_RIVER = 2
16 MANGROVE_MIGRATION = 5
17 MANGROVE_INUNDATION = 6
18 --
19 -- Model Parameters
20 Area_cell = 1 -- Cell area in ha
21 Initial_time = 1 -- correspondent to 2013
22 Final_time = 88 -- correspondent to 2100
23 Tx_elev = 0.011 -- Rate of sea-level rise (m) in a scenario of increase of approximately 0.81 m by 2100 (IPCC, 2013, p.17).
24 Z = 6 -- Tide height on the Maranhão Island (Ferreira, 1988).
25 Year_initial = 2012
26 -----
27 -- Database
28 cs = CellularSpace{
29   dbType = "ADO",
30   database = "D:\\Banco_mangue_4.2.0\\mangue.mdb",
31   theme = "Cell_usos",
32   select= { "Alt2", "ClasseUsos2", "ClasseSolos" }
33 }
34 cs:createNeighborhood {
35   strategy = "moore",
36   self = false
37 }
38 cs:synchronize();
39 -----
40 -- Legend
41 ClasseUsos2Leg = Legend{
42   grouping = "uniquevalue",
43   colorBar = {
44     {value = SEE, color = "blue"},
45     {value = MANGROVE, color = (66,111,66)},
46     {value = BEACH, color = "cyan"},
47     {value = ANTHROPIC_AREA, color = "yellow"},
48     {value = ANTHROPIC_AREA2, color = (0,0,0)},
49     {value = TERRESTRIAL_VEGETATION, color = (35,142,104)},
50     {value = MANGROVE_MIGRATION, color = (0,255,0)},
51     {value = MANGROVE_INUNDATION, color = "red"}
52   }
53 }
54
55 -- Observers
56 obsMap = Observer{ subject = cs, type = "map", attributes = {"ClasseUsos2"}, legends = {ClasseUsos2Leg} }
57 -- obsMap = Observer{ subject = cs, type = "image", DB_HOME = THE_PATH .. "C:\\Program Files (x86)\\terrame", attributes = {"ClasseUsos2"}, legends = {ClasseUsos2Leg} }
58 -----
59 -- Model Loop for sea-level rise
60 for time = Initial_time, Final_time, 1 do
61   coord = Coord(x = 68, y = 132)
62   cellreference = cs:getCell(coord)
63   cellreference.Alt2 = 0,147705
64   --
65   Mangrove_area = MANGROVE or MANGROVE_MIGRATION -- Total area of mangrove in ha
66   Mangrove_area_remaining = MANGROVE -- Area of remaining mangrove in ha
67   Mangrove_area_inundation = MANGROVE_INUNDATION -- Mangrove inundation in ha
68   Mangrove_area_migration = MANGROVE_MIGRATION -- Mangrove migration in ha
69   SOIL2_AREA_progradation = MANGROVE_SOIL2 -- areas of progradation of mud (ha)
70   ANTHROPIC_inundation = ANTHROPIC_AREA2
71   --
72   --
73   --
74   forEachCell(cs, function(cell)
75     -- Simulation of the rising sea level
76     if cell.ClasseUsos2 == SEE and cell.Alt2 >= 0 then
77       Increased_see = cell.Alt2 + (time * Tx_elev)
78       -- Sea-level rise in the cell reference
79       Elev_cellreference = cellreference.Alt2 + (time * Tx_elev)
80       -- Rate of vertical accretion of mud - Txa (in mm)
81       Elev_mm = Elev_cellreference * 1000 -- Sea-level rise in mm
82       Txa = 1.693 + (0.939 * Elev_mm) -- Equation proposed by Alongi (2008) with R2 = 0,704 and p < 0,001
83       Txa_m = Txa / 1000 -- Txa in metres
84       -- Increment of the area of tidal influence
85       Z_m = Z + Elev_cellreference
86       -- Find the lowest neighbor
87       countNeigh = 0
88       forEachNeighbor(cell, function(cell, neigh)
89         if (cell.Alt2 >= neigh.Alt2) then
90           countNeigh = countNeigh + 1
91         end
92       end)
93       --
94       -- Simulating the advancement of mud banks
95       if (cell.ClasseSolos == MANGROVE_SOIL or cell.ClasseSolos == CHANNEL_RIVER) and (neigh.ClasseSolos == MANGROVE_SOIL) then
96         forEachNeighbor(cell, function(cell, neigh)
97           if (neigh.Alt2 <= Z_m) and
98             (neigh.ClasseUsos2 == SEE) then
99             neigh.ClasseSolos = MANGROVE_SOIL2
100             SOIL2_AREA_progradation = SOIL2_AREA_progradation + Area_cell
101           end
102         end)
103       end
104     end
105   end)

```

```

105 -- rate of vertical accretion of mud in each cell
106 if (cell.past.ClasseSolos ~= MANGROVE_SOIL2 and cell.ClasseSolos == MANGROVE_SOIL2) or (cell.ClasseSolos == MANGROVE_SOIL) and
107 (cell.ClasseUsos2 ~= SEE) then
108     cell.Alt2 = cell.Alt2 + Txa_m
109 end
110 --
111 -- Simulating the flow of water to the neighbors
112 if (countNeigh > 0) then
113     flux = Increased_see / countNeigh
114 end
115 --
116 --
117 -- Simulation of the inundation from neighboring
118 if cell.ClasseUsos2 == SEE and neigh.ClasseUsos2 ~= SEE then
119     forEachNeighbor(cell, function(cell, neigh)
120         if Increased_see >= (neigh.Alt2 + flux) then
121             neigh.ClasseUsos2 = SEE
122         end
123     end)
124 end
125 --
126 --
127 end
128 end)
129 --
130 --End: Simulation of the sea-level rise
131 -----
132 -- Simulation of mangrove migration
133 forEachCell(cs, function(cell)
134     if (cell.ClasseUsos2 == MANGROVE) then
135         forEachNeighbor(cell, function(cell, neigh)
136             if (neigh.ClasseUsos2 == MANGROVE) then
137                 if (Z_m >= neigh.Alt2) and
138                     (neigh.ClasseUsos2 == TERRESTRIAL_VEGETATION) and
139                     (neigh.ClasseSolos == MANGROVE_SOIL or MANGROVE_SOIL2) then
140                         neigh.ClasseUsos2 = MANGROVE_MIGRATION
141                     end
142                 end
143             end)
144         end
145     end)
146 --
147 -- Simulation of mangrove inundation
148 forEachCell(cs, function(cell)
149     if (cell.past.ClasseUsos2 == MANGROVE or cell.past.ClasseUsos2 == MANGROVE_MIGRATION) and cell.ClasseUsos2 == SEE then
150         cell.ClasseUsos2 = MANGROVE_INUNDATION
151         Mangrove_area_inundation = Mangrove_area_inundation + Area_cell
152     end
153 end)
154 --
155 -- Simulation of mangrove migration
156 forEachCell(cs, function(cell)
157     if cell.past.ClasseUsos2 == TERRESTRIAL_VEGETATION and cell.ClasseUsos2 == MANGROVE_MIGRATION then
158         Mangrove_area_migration = Mangrove_area_migration + Area_cell
159     end
160 end)
161 --
162 -- Simulation of remaining mangrove
163 forEachCell(cs, function(cell)
164     if cell.past.ClasseUsos2 == MANGROVE and cell.ClasseUsos2 == MANGROVE then
165         Mangrove_area_remaining = Mangrove_area_remaining + Area_cell
166     end
167 end)
168 --
169 -- Simulation of total area (mangrove)
170 forEachCell(cs, function(cell)
171     if (cell.ClasseUsos2 == MANGROVE or
172         cell.ClasseUsos2 == MANGROVE_MIGRATION) then
173         Mangrove_area = Mangrove_area + Area_cell
174     end
175 end)
176 --
177 -- Simulation of anthropic area inundation
178 forEachCell(cs, function(cell)
179     if cell.past.ClasseUsos2 == ANTHROPIC_AREA and cell.ClasseUsos2 == SEE then
180         cell.ClasseUsos2 = ANTHROPIC_AREA2
181         ANTHROPIC_inundation = ANTHROPIC_inundation + Area_cell
182     end
183 end)
184 Year = Year_initial + time
185 --
186 print("Year:", Year)
187 print("Total area:", Mangrove_area)
188 print("Remaining area:", Mangrove_area_remaining)
189 print("Progradation:", SOIL2_AREA_progradation)
190 print("Vertical accretion:", Txa_m)
191 print("Sea-level rise:", Elev_cellreference)
192 print("Tide height:", Z_m)
193 print("Mangrove migration:", Mangrove_area_migration)
194 print("Mangrove inundation:", Mangrove_area_inundation)
195 print("Anthropic area inundation:", ANTHROPIC_inundation)
196 -- --
197 --
198 -- if i == 88 then
199 --     cs:save(i, "result", "ClasseUsos")
200 -- end
201 cs:notify()
202 end
203 print("Simulation performed with successfully")

```

APÊNDICE B – RESULTADOS COMPLETOS DO EXPERIMENTO DE MODELAGEM

Ano	Elevação do NMRM (m)	Área total de manguezal (ha)	Área remanescente de manguezal (ha)	Acreção longitudinal (ha)	Acreção vertical (m/ha)	AIM (m)	Migração (ha)	Inundação de manguezal (ha)	Área antrópica inundada
2013	0,01	17713	16918	1207	0.01	6.01	800	476	126
2014	0,02	17713	16918	1260	0.02	6.02	800	460	124
2015	0,03	17713	16918	1287	0.03	6.03	800	460	124
2016	0,04	17713	16918	1310	0.04	6.04	800	460	124
2017	0,06	17713	16918	1324	0.05	6.06	800	460	124
2018	0,07	17713	16918	1329	0.06	6.07	800	460	124
2019	0,08	17710	16915	1337	0.07	6.08	800	463	124
2020	0,09	17710	16915	1338	0.08	6.09	800	462	123
2021	0,10	17710	16915	1341	0.09	6.1	800	460	123
2022	0,11	17709	16914	1341	0.1	6.11	800	461	125
2023	0,12	17709	16914	1341	0.12	6.12	800	461	125
2024	0,13	17709	16914	1341	0.13	6.13	800	461	125
2025	0,14	17096	16357	1312	0.14	6.14	744	1017	825
2026	0,15	17093	16354	1283	0.15	6.15	744	972	793
2027	0,17	17088	16349	1302	0.16	6.17	744	979	796
2028	0,18	17011	16275	1308	0.17	6.18	741	1081	868
2029	0,19	17008	16272	1306	0.18	6.19	741	1072	857
2030	0,20	17006	16270	1328	0.19	6.2	741	1072	857
2031	0,21	16967	16232	1323	0.2	6.21	740	1113	864
2032	0,22	16967	16232	1329	0.21	6.22	740	1107	861
2033	0,23	16962	16227	1312	0.22	6.23	740	1108	861

2034	0,24	16958	16223	1317	0.23	6.24	740	1107	861
Ano	Elevação do NMRM (m)	Área total de manguezal (ha)	Área remanescente de manguezal (ha)	Acreção longitudinal (ha)	Acreção vertical (m/ha)	AIM (m)	Migração (ha)	Inundação de manguezal (ha)	Área antrópica inundada
2035	0,25	16916	16186	1302	0.24	6.25	735	1175	879
2036	0,26	16911	16183	1301	0.25	6.26	733	1146	875
2037	0,28	16910	16182	1291	0.26	6.28	733	1152	876
2038	0,29	16816	16102	1285	0.27	6.29	719	1228	882
2039	0,30	16814	16100	1278	0.28	6.3	719	1228	879
2040	0,31	16814	16100	1274	0.29	6.31	719	1227	879
2041	0,32	16814	16100	1295	0.3	6.32	719	1210	879
2042	0,33	16814	16100	1289	0.31	6.33	719	1210	896
2043	0,34	16728	16019	1261	0.32	6.34	714	1309	900
2044	0,35	16726	16019	1267	0.33	6.35	712	1304	897
2045	0,36	16726	16019	1269	0.34	6.36	712	1304	899
2046	0,37	16726	16019	1290	0.35	6.37	712	1297	923
2047	0,39	16720	16013	1281	0.36	6.39	712	1311	897
2048	0,40	16720	16013	1285	0.37	6.4	712	1293	896
2049	0,41	16621	15914	1298	0.38	6.41	712	1386	905
2050	0,42	16621	15914	1295	0.39	6.42	712	1383	903
2051	0,43	16613	15906	1286	0.4	6.43	712	1421	925
2052	0,44	16613	15906	1286	0.41	6.44	712	1411	903
2053	0,45	16613	15906	1312	0.43	6.45	712	1416	903
2054	0,46	16611	15904	1303	0.44	6.46	712	1407	903
2055	0,47	16609	15902	1307	0.45	6.47	712	1412	903
2056	0,48	16609	15902	1311	0.46	6.48	712	1416	903

2057	0,50	16609	15902	1311	0.47	6.5	712	1385	903
Ano	Elevação do NMRM (m)	Área total de manguezal (ha)	Área remanescente de manguezal (ha)	Acreção longitudinal (ha)	Acreção vertical (m/ha)	AIM (m)	Migração (ha)	Inundação de manguezal (ha)	Área antrópica inundada
2058	0,51	16538	15836	1307	0.48	6.51	707	1457	947
2059	0,52	16537	15836	1316	0.49	6.52	706	1482	936
2060	0,53	16533	15832	1297	0.5	6.53	706	1477	936
2061	0,54	16531	15830	1303	0.51	6.54	706	1486	936
2062	0,55	16531	15830	1292	0.52	6.55	706	1477	936
2063	0,56	16531	15830	1298	0.53	6.56	706	1484	936
2064	0,57	16510	15809	1283	0.54	6.57	706	1490	965
2065	0,58	16510	15809	1283	0.55	6.58	706	1466	943
2066	0,59	16507	15806	1295	0.56	6.59	706	1508	939
2067	0,61	16447	15752	1293	0.57	6.61	700	1549	948
2068	0,62	16445	15750	1290	0.58	6.62	700	1561	948
2069	0,63	16445	15750	1289	0.59	6.63	700	1564	948
2070	0,64	16445	15750	1271	0.6	6.64	700	1543	948
2071	0,65	16444	15749	1275	0.61	6.65	700	1549	948
2072	0,66	16444	15749	1270	0.62	6.66	700	1529	949
2073	0,67	16388	15694	1274	0.63	6.67	699	1587	980
2074	0,68	16386	15692	1280	0.64	6.68	699	1620	979
2075	0,69	16383	15689	1269	0.65	6.69	699	1599	996
2076	0,70	16380	15686	1280	0.66	6.7	699	1626	979
2077	0,72	16368	15675	1285	0.67	6.72	698	1638	979
2078	0,73	16368	15675	1272	0.68	6.73	698	1624	979
2079	0,74	16368	15675	1270	0.69	6.74	698	1603	979

2080	0,75	16368	15675	1270	0.7	6.75	698	1585	985
Ano	Elevação do NMRM (m)	Área total de manguezal (ha)	Área remanescente de manguezal (ha)	Acreção longitudinal (ha)	Acreção vertical (m/ha)	AIM (m)	Migração (ha)	Inundação de manguezal (ha)	Área antrópica inundada
2081	0,76	16295	15616	1284	0.71	6.76	684	1690	1027
2082	0,77	16295	15616	1263	0.72	6.77	684	1665	1025
2083	0,78	16295	15616	1272	0.74	6.78	684	1673	1025
2084	0,79	16295	15616	1281	0.75	6.79	684	1686	1049
2085	0,80	16173	15507	1277	0.76	6.8	671	1797	1032
2086	0,81	16172	15506	1266	0.77	6.81	671	1771	1036
2087	0,83	16172	15506	1266	0.78	6.83	671	1755	1036
2088	0,84	16156	15490	1271	0.79	6.84	671	1779	1118
2089	0,85	16152	15486	1259	0.8	6.85	671	1789	1117
2090	0,86	16140	15474	1275	0.81	6.86	671	1817	1142
2091	0,87	16140	15474	1269	0.82	6.87	671	1790	1144
2092	0,88	16140	15474	1267	0.83	6.88	671	1778	1142
2093	0,89	16140	15474	1274	0.84	6.89	671	1813	1142
2094	0,90	16140	15474	1263	0.85	6.9	671	1775	1142
2095	0,91	16138	15472	1262	0.86	6.91	671	1777	1142
2096	0,92	16138	15472	1266	0.87	6.92	671	1799	1142
2097	0,94	16134	15468	1260	0.88	6.94	671	1818	1163
2098	0,95	16132	15466	1268	0.89	6.95	671	1819	1141
2099	0,96	16132	15466	1262	0.9	6.96	671	1789	1141
2100	0,97	16123	15457	1260	0.91	6.97	671	1797	1141

ANEXO A - ARTIGOS PUBLICADOS

Simulating Sea-Level Rise Impacts on Mangrove Ecosystem adjacent to Anthropic Areas: the case of Maranhão Island, Brazilian Northeast.

Simulating Sea-Level Rise Impacts on Mangrove

Artigo aceito para publicação no *Pan-American journal of aquatic sciences* em 2014

Denilson da Silva Bezerra^{1*}, Silvana Amaral¹, Milton Kampel¹, Pedro Ribeiro de Andrade¹

^{1*} University Ceuma - UNICEUMA

Post Office Box 515 - 65075-120 – São Luís - MA, Brazil

¹ National Institute for Space Research - INPE

Post Office Box 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brazil

{denilson.bezerra@inpe.br*, silvana@dpi.inpe.br, milton@dsr.inpe.br, pedro.andrade@inpe.br}

Abstract. Sea-level rise is one of the main effects of climate changes on coastal zones; mangroves are particularly sensitive to this process. In addition, intense human occupation hinders mangrove colonization of new areas. This paper proposes a methodological approach, using spatially explicit modeling based on cellular automata, to simulate impacts of sea-level rise on mangrove ecosystems. Initially, we present the conceptual model, the rules for interaction between model elements, and the methodological procedure for computational implementation. The model was applied simulating 10 elevation steps from 0.1 to 1 m on Maranhão Island which contains an extensive mangrove area and is densely occupied. The results are presented in the context of changes in mangrove areas (increase or reduction). The simulation showed that the mangrove area increased about 6.75% to 0.3 m of sea level rise. However, for values above 0.4 m, it showed a significant loss of area, indicating the complexity of its response to sea-level rise in anthropic areas. Our work suggests that modeling tools can be useful for the study of sea-level rise impacts on mangrove, especially in complex land cover areas such as the Brazilian coastal zone.

Keywords: climate change, coastal zone, spatially explicit modeling, cellular automata, elevation steps

Resumo. Simulando impactos da elevação do nível do mar no ecossistema manguezal adjacente a áreas antrópicas: o caso da Ilha do Maranhão, nordeste brasileiro. A elevação do nível do mar é um efeito típico das mudanças climáticas; o manguezal é particularmente sensível a este processo. A ocupação humana inviabiliza a colonização do manguezal em novas áreas. Este artigo propõe uma abordagem metodológica para simular os impactos da elevação do mar no manguezal, usando modelagem espacialmente explícita baseada em autômatos celulares. Inicialmente é apresentado o modelo conceitual, as regras para a interação entre os elementos e os procedimentos metodológicos para implementação computacional. A simulação considera 10 passos de elevação de 0.1 a 1 m na Ilha do Maranhão que contém extensa área de manguezal e é densamente ocupada. Os resultados são apresentados no contexto de alterações nas áreas de manguezal (aumento e redução). A simulação evidenciou que o mangue aumentou em cerca de 6,75 % a 0,3 m de elevação. Contudo, para valores acima de 0,4 m, o manguezal apresentou uma expressiva perda de área, indicando a complexidade da resposta do manguezal a elevação do mar em áreas antropizadas. Os resultados obtidos sugerem que ferramentas de modelagem podem ser usadas para

estudar os impactos da elevação do nível do mar no manguezal, principalmente em áreas de uso e ocupação complexos como na zona costeira brasileira.

Palavras-chave: mudança climática, zona costeira, modelagem espacialmente explícita, autômato celular, passos de elevação

INTRODUCTION

Mangrove is an environment of transition between the sea and the continent, this ecosystem plays a vital role in conserving biodiversity and buffering disturbance in coastal regions (Lugo *et al.* 2010). For the products and services offered by mangroves, it is estimated that annual monetary values range from US\$ 200,000,000 to US\$ 900,000,000 per km² (UNEP-WCMC 2006).

The distribution of mangroves in the Brazilian territory spreads from the Brazilian border with the French Guiana, just above the Equator line (04° 30' N), to the state of Santa Catarina (28° 30' S) (Schaeffer-Novelli *et al.* 2000). The largest continuous mangrove area of the planet is in the Brazilian Amazon (Souza-Filho 2005) with approximately 8,900 km² in length (Kjerfve *et al.* 2002). Brazil has 13,000 km² of mangroves, being the second country in total mangrove area (Spalding *et al.* 2010).

The process of anthropogenic warming of the climate system is likely to have probably initiated during the pre-industrial time (IPCC 2007). One typical effect of climate change is the phenomenon of sea-level rise; this process is irreversible for at least 1,000 years as a result of thermal expansion of the oceans (Solomon *et al.* 2009). According to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR4-IPCC), sea

level rise during the 20th century ranged from 0.12 m to 0.22 m (IPCC 2007), other projections indicate that sea-level rise might oscillate from 0.26 m to 0.59 m until the last decade of the 21st century (Solomon *et al.* 2007). More recent estimates indicate that the average rise in sea level can reach up to 1m by 2100 (Lowe *et al.* 2009).

Among the anticipated effects of climate change, sea-level rise is the primary factor for the modifications in mangrove environments (Field 1995, Lovelock & Ellison 2007). In response to the impacts of sea-level rise, mangrove ecosystems may suffer profound modifications, such as a decrease or an increase of the ecosystem areas, migration, loss of biological diversity, and changes in the supply of environmental products and services (McLeod & Salm 2006).

Land cover types associated to human presence may maximize the negative impacts of the process of sea-level rise on mangroves because human occupation usually impairs the mangrove colonization in new areas where sea-level rise occurs (Lovelock & Ellison 2007, Soares 2009, Faroco *et al.* 2010).

So far, in Brazil, there have been few studies of anthropic climate change impacts on mangrove ecosystems: Soares (2009) developed a conceptual model for mangrove response to sea-level rise and Faroco *et al.* (2010) analyzed the vulnerability to climate

change for the social-ecological system in Brazilian mangroves.

Understanding the impacts of climate change on mangrove dynamics in Brazil is a great challenge once the Brazilian mangrove provides many products and services to the coastal zone. For example, Brazilian artisanal fishermen are highly dependent on mangrove resources and services (Faroco *et al.* 2010).

The use of computational models can help understand the response pattern of mangroves to climate change (Berger *et al.*, 2008). This tool has been used to simulate the impacts of sea-level rise (Doyle *et al.*, 2010) and hurricanes (Doyle 2003) on mangrove ecosystems.

This paper proposes the use of computational modeling approach based on cellular automata to simulate mangrove response to sea-level rise in anthropic areas. We propose a conceptual model, integrating land cover types, sea level dynamics, and biophysical conditions, implemented in a spatially explicit model. The model simulated the effects of sea-level rise on Maranhão Island, state of Maranhão, Brazil, where mangroves and anthropogenic activities dominate the landscape.

Since computational models can be used as an additional tool to understand and simulate impacts on mangrove environments (Berger *et al.* 2008), our work aims to contribute to the development of further strategies for mitigation and adaptation of the effects of climate change on mangroves, especially for those adjacent to urban areas.

Conceptual Model

Mangrove responses to sea-level rise depend on factors such as topography, tidal range, land cover in adjacent areas, coastal dynamics and mean rate of sea-level rise (McLeod & Salm 2006, Lovelock & Ellison 2007). In order to represent and simulate the impacts of sea-level rise on coastal zones, we propose a general conceptual model that stratifies the relevant aspects specific for the mangrove persistence in four components (Figure 1).

Sea-level rise reaches different land cover types in a geographical space. Each land cover type is considered as a barrier or potential area for mangrove migration, restricted by the environmental conditions for mangrove establishment.

The biophysical condition and adjacent land cover mosaic cause various impacts on mangrove dynamics: water column increase, displacement of the area over tidal influence, mangrove inundation, and mangrove migration to continent, as described in the literature (Scavia *et al.* 2002, Alongi 2008, Gilman *et al.* 2008).

This general framework supports further extensions, by adding other components that could include the influence of hydrology, climate or even oceanic circulation for mangrove dynamics, not addressed at this stage of our work. Any proposed components can become as complex as the theoretical subjacent assumptions. Each component of the actual conceptual model is a module for its implementation and has its particular assumptions.

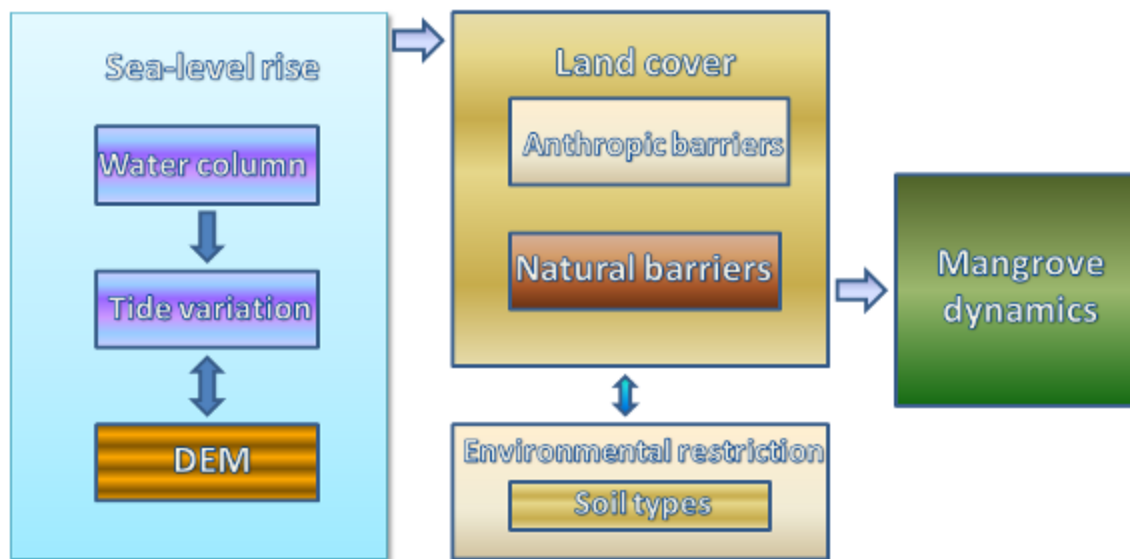


Figure 1. Diagram demonstrating the general conceptual model proposed to simulate the impacts of sea-level rise on mangrove areas.

In the Sea-level rise Module, the reference for the inundation process is the value of the water column in relation to the topography of adjacent areas, indicated by the Digital Elevation Model (DEM). When the sea advances toward the continent, mangrove and other land cover type areas may be inundated. We consider that a negative impact on mangrove: the inundation may reduce the mangrove area and may affect its ability to provide services to the coastal zone.

Tide height defines areas under tidal influence (Miranda *et al.* 2002) which are regions to where mangrove can progress. Sea-level rise can displace tidal influence, favoring the migration of mangroves (Ellison 1993, Schaeffer-Novelli Y, *et al.* 2002, Gilman *et al.* 2008). This phenomenon can be considered a positive impact since it may promote the expansion of mangrove areas.

In the Land Cover Module, each land cover type can be considered either

an anthropic barrier or prone to be converted to mangrove area. The process of migration can be rendered impossible due the presence of anthropic and natural barriers (Soares 2009, Faroco *et al.* 2010). Here, anthropic barriers are represented by areas where native vegetation has been removed and converted to impervious surfaces as result of human activities. Natural barriers are beaches as well as areas that are out of reach of tidal influence.

In the Environmental Restriction Module, at this stage, only soil type is considered. Mangroves grow on substrates with high silt and clay content, with high salinity levels, under strong tidal influence, and in conditions close to anoxia (McLeod & Salm 2006, Spalding *et al.* 2010). In general, specific soil type, as indiscriminate mangrove soils, holds ideal conditions for colonization by mangrove typical vegetation, whereas other soils (dystrophic yellow medium texture and

podzolic red-yellow concretionary) are considered as barriers to mangrove occupation.

The Mangrove Dynamic Module describes the impacts resulted from the interactions between the sea-level rise over the terrain, the land cover pattern, and the environmental constraints. It will determine the conditions for mangrove persistence, migration or retraction, leading to different impacts on its service provisions, for a specific area.

METHODS

The Modeling Environment

Based on the conceptual model, the computational model was implemented using a toolbox for spatially explicit modeling integrated with geospatial databases called TerraME9 (Carneiro *et al.* 2013): a programming environment for spatial dynamical modeling, supporting cellular automata, agent-based models, and network models running in 2 D cellular spaces.

We used the language Lua, an open-source interpreted language with extensible semantics, to implement the model source code at TerraME (see supplementary material).

Our implementation is based on the cellular automata computational model, a logical system which has the concept of cell as the basic unit: each cell has a neighborhood of cells and a discrete state that may vary during the simulation according to its transition rules (Wolfram 1983).

Test Site

As a spatially explicit modeling procedure was used, Maranhão Island in the northeast of Brazil was chosen as test site. The island contains extensive mangrove areas of 17,387 ha (Rebello-Mochel 2003) and is densely occupied, including the city of São Luis, the capital of Maranhão state with 1,014,837 inhabitants (IBGE 2010).

Maranhão Island, also known as São Luís Island (Figure 2) is an archipelago with more than 50 islands of various sizes and origins, located on the northern coast of the state, in the Brazilian Amazon between 2° 24' 10"S and 2° 46' 37"S, and 44° 24' 30"W and 43° 59' 43"W . The coastline is deeply indented, with approximately 626 km of perimeter, along which the mangrove ecosystem is present in about 90% of it, covering 146,49 km² (Rebello-Mochel 2003). Another striking feature of Maranhão Island is the presence of macromareal that can vary from 6 to 7 m (Ferreira 1988).

⁹ Available at <http://www.terrame.org>

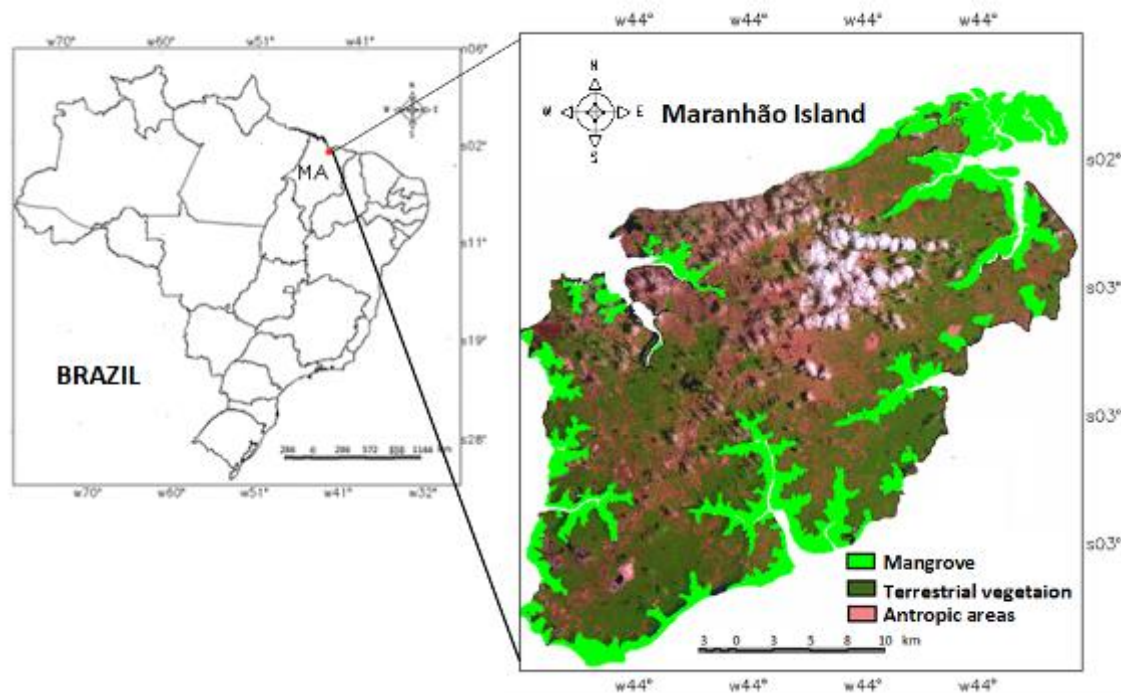


Figure 2. Test site: Maranhão Island in the Brazilian Northeast, state of Maranhão (MA).

The topography on Maranhão Island is gently undulated, with altitudes of up to 60 meters (Pereira & Zane 2007). It favors severe saltwater intrusion in rivers and forms extensive estuarine areas (Silva Junior *et al.* 2007).

The dynamics of the local marine intrusion influences the pedology of the study site, which is composed of three main soil classes: indiscriminate mangrove soils, yellow dystrophic medium texture soil, and red-yellow concretionary podzolic (UEMA 2000, EMBRAPA 2002).

The indiscriminate mangrove soils are very poorly drained areas, with high salinity from seawater and sulfur compounds, occurring in low sedimentary sites that are frequently flooded, and where the organic matter accumulates on the coast. These characteristics confer ideal conditions for colonization by typical mangrove

vegetation on mangrove soils (UEMA 2000, EMBRAPA 2002, Rebelo-Mochel 2003).

Geographical Database and Cellular Space

For the model simulation procedure, a geographical database was organized at TerraView 4.2.0 geographical information system (INPE, 2011). Adopting the spatial resolution of 1 ha (100 x 100 m), the study site was represented by a cellular space containing 94,704 cells (Figure 3a).

As a cellular automata system, each cell has at a certain time, a unique state and a set of attributes that defines this state. During the simulation procedures, the states and attributes of every cell can change according to the transition rules.

The initial state of the cell corresponds to the land cover class at the initial time. For Maranhão Island,

the mangrove mapping for the year 2008 done by the Brazilian Institute of Environment and Renewable Resources (IBAMA) was updated by visual interpretation of 2011 ETM/Landsat 5 images, keeping the original land cover classes (Figure 3b): mangrove, estuary, anthropic area, terrestrial vegetation and beach. In each cell, the majority land cover class defines the cell state.

As cell attributes, soil classes (Figure 3c), altimetry (Figure 3d) and tide height values were assigned to each cell at each inundation step. The most frequent soil type at each cell was identified from the official soil mapping by the Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA 2002). The minimum value of altimetry was computed for each cell from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) DEM (Miranda 2005). The tide height on Maranhão Island is 6 m on average (Ferreira 1988) and was validated by tide data from the oceanographic database of Brazilian Navy¹⁰.

¹⁰ www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas

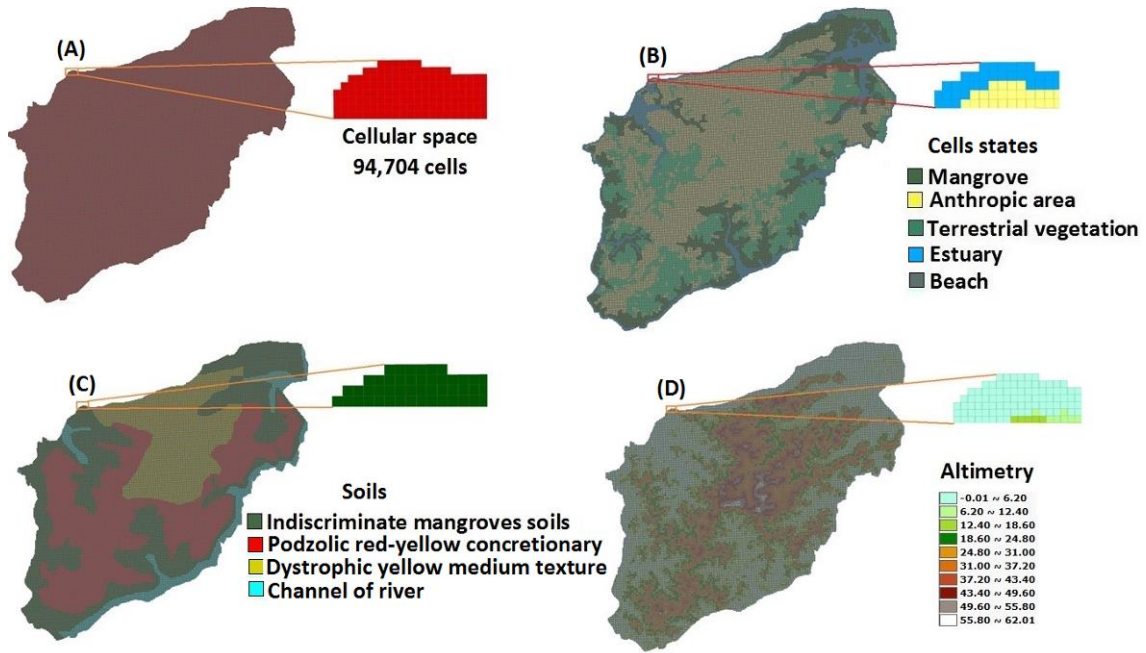


Figure 3. Cellular space: (A) Empty cellular space (B); Cell states; (C) Attribute-soils; (D) Attribute-Altimetry.

Model Behavior

In order to run a model experiment from the conceptual model, a set of rules, or logical constraints, guides the behavior of cell condition and transitions. The initial condition (cell state) defined by the mangrove cell, water cell, anthropic cell, terrestrial vegetation cell and beach cell changes according to the process of sea-level rise following specific rules:

A) The process of sea-level rise: we simulate a scenario of sea-level rise up to 1 m, distributed as an arithmetic progression of reason 0.1 m ("*i*") over 10 intermediate elevation steps (the scenarios of sea-level rise), as demonstrated in the equation (1):

$$(1) \text{ Sea-Level Rise} = wc + (\text{elevation step} \times i)$$

Where: "*Sea-level rise*" is the value of sea-level rise in each water cell at current "*elevation step*";

"*Elevation step*" corresponds to the time step required for the sea-level rise. We consider that each elevation step is equivalent to one year;

"*wc*" is the value of water column (in meters) at current elevation step in each water cell;

"*i*" is a constant related to the sea-level rise increment whose the value is 0.1m/elevation step.

The water flux (Flux) corresponds to the displacement of water that occurs from a cell to another, this process originates from a water cell towards neighboring cells of any land cover class (mangrove cell, anthropic cell, terrestrial vegetation cell and beach cell) that have the altitude

value lower than the sea-level rise, as expressed at equation (2):

$$(2) \quad \text{Flux} = \text{Sea-level rise} / \text{neighboring cells},$$

Where:

“*Flux*” corresponds to the value of “*Sea-level rise*” divided by the number of neighboring cells of each water cell.

“*Neighboring cells*” corresponds to the number of neighboring cells of each water cell. The water cells may have up to 8 neighboring cells.

B) Land cover dynamics: the land cover changes and the persistence or migration of mangrove areas follow specific rules:

- a) Mangrove only exists in the area under tidal influence (ATI), as indicated by Field (1995) and Spalding *et al.* (2010);
- b) The ATI is determined by the tide height (Miranda *et al.* 2005);
- c) Initially, the ATI value is 6 m, as indicated by Ferreira (1988) and validated by tide data from the oceanographic database of the Brazilian Navy. As the sea-level rises, the value of ATI is updated by adding the sea level increment;
- d) At every elevation step of sea-level rise, mangrove cells may migrate to adjacent cells since natural or anthropogenic barriers are not present on ATI. In this case, cells of land cover class assigned as terrestrial vegetation are converted to mangrove cell (mangrove migration);
- e) Cells of land cover class assigned as anthropic cells are anthropic barriers. Natural barriers correspond to cells in which the altimetry attribute value is higher than the ATI, or the soil attribute is different than indiscriminate mangrove soil, or when the cell land cover is equal to beach;
- f) The mangrove inundation occurs when the height of the water column is greater than or equal to the altimetry of adjacent mangrove cells. In this case, mangrove cells change to water cell (mangrove inundation);
- g) Cells classified as anthropic cell, beach cell, and terrestrial vegetation cell can also be inundated by the rising of the sea level. In this case, the inundation occurs when the height of the water column is greater than or equal to the altimetry of adjacent cells.

RESULTS & DISCUSSION

The model simulated scenarios of sea-level rise on Maranhão Island for ten elevation steps from 0.1 to 1 m. For every scenario we computed the resulting variation of the mangrove area, mangrove inundation, and mangrove migration. The total mangrove area on Maranhão Island in 2011 was 17,387 ha, corresponding to the initial condition. Figure 4 presents the total mangrove area simulated at each sea level scenario. From the initial condition up to 0.3 m of sea-level rise, the mangrove area presented an increase of approximately 1,173 ha which

corresponds to a percentage rate of 6.75 %.

These results are consistent with the literature that indicates positive variation of mangrove areas according to sea rise levels, also depicting potential areas of mangrove increase as the salt water increasingly penetrates in rivers and estuaries (Lacerda *et al.* 2007). França *et al.* (2012) investigating the impacts of sea-level rise and climate change on the Brazilian Amazon coast during the late Holocene confirmed that the sea-level rise is the most likely factor that may cause the expansion of mangroves.

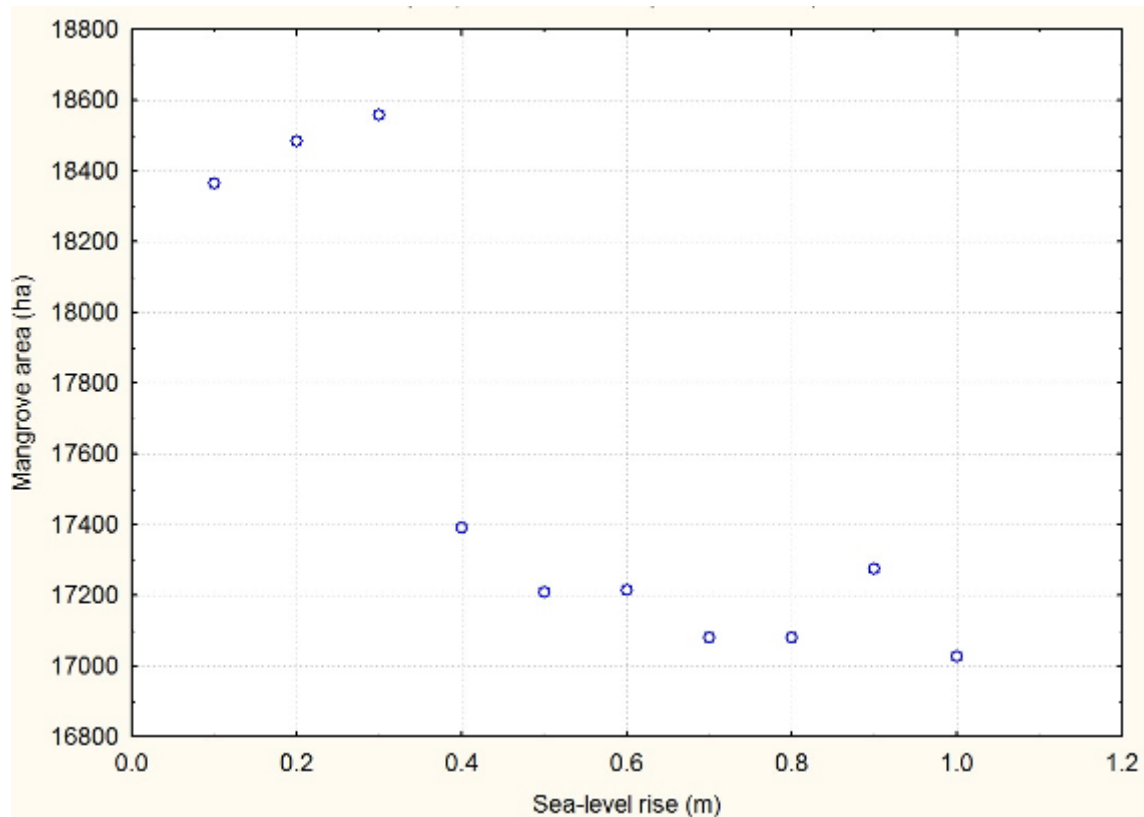


Figure 4. Total mangrove area (ha) according to sea-level rise (m) simulated for Maranhão Island, Brazil, simulated by the proposed model.

After simulation step 3, sea-level rise higher than 0.4 m resulted in the retraction of mangrove areas. This pattern of mangrove reduction continued until the value of 0.8 m of

sea-level rise, moment in which the mangrove area showed a slight increase and, at the final elevation step, the simulated area was 17, 028 ha; 2.06 % less than the initial mangrove area.

Comparing the highest value of mangrove area (18,560 ha at elevation step 3) in relation to the lowest value simulated (17,028 ha at elevation 10), the most significant rate of mangrove retraction was 8.25% (1,532 ha).

The simulation of mangrove migration and inundation in each elevation step is shown in Figure 5. The process of mangrove migration increased about 1,327 ha at the first step 1 (0.1 m of sea level elevation), but in

the subsequent events it decreased, ranging from 222 to 6 ha, when the sea-level rise reached the maximum value (1 m).

The loss of mangrove area remained approximately constant, in average 119 ha, up to 0.3 m of sea-level rise, and presented a continuous increase during the simulation of sea level over 0.4 m, ranging from 679 to 957 ha.

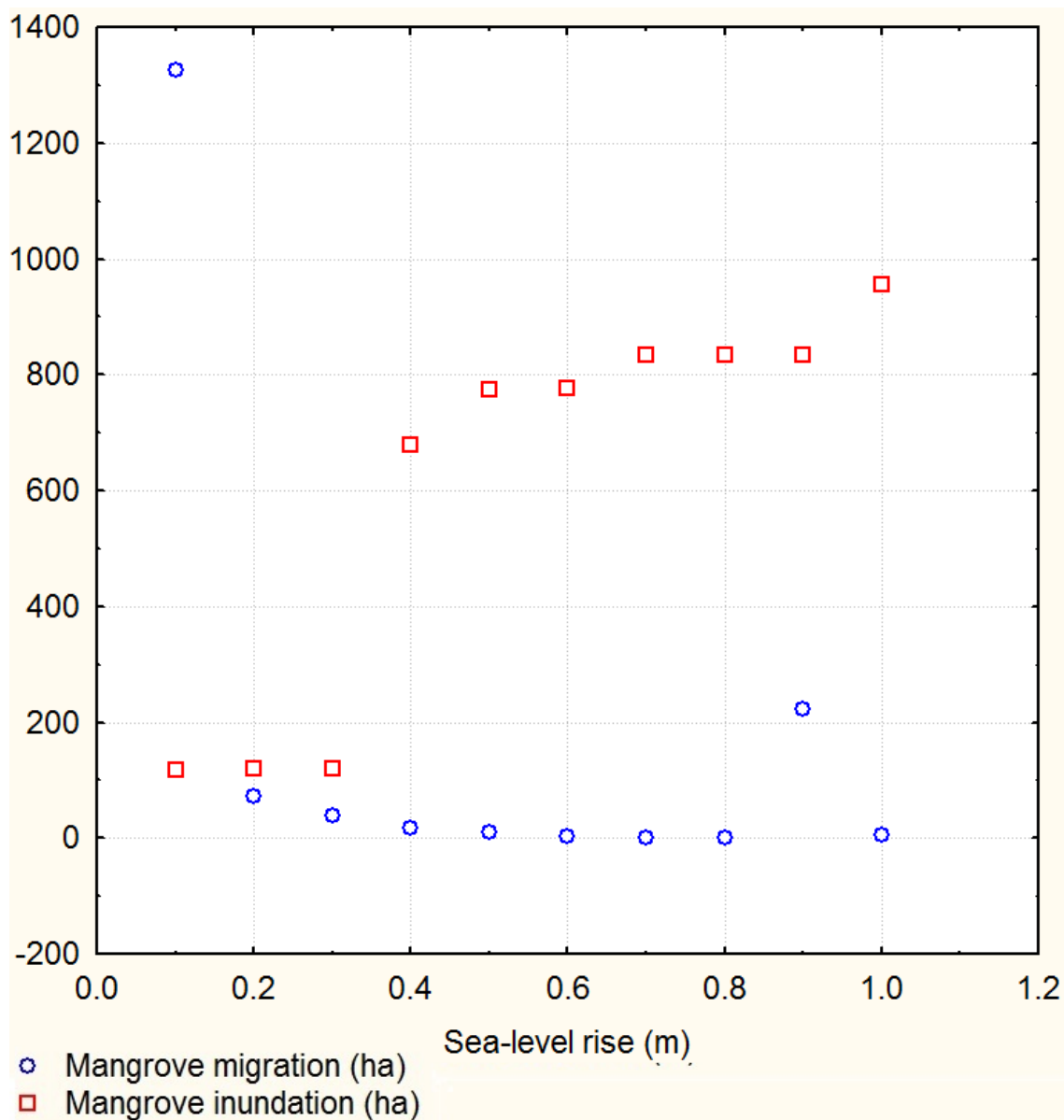


Figure 5. Mangrove migration and inundation (ha) according to sea-level rise (m) simulated for Maranhão Island (Brazil) by the proposed model.

The migration and colonization of new mangrove areas may be limited by human occupation of adjacent areas, which restricts this ecosystem's capacity to adapt to new conditions (Scavia *et al.* 2002). This may explain the loss of mangrove area for the simulation values of sea-level rise higher than 0.3 m (see Figure 4).

Ellison (1993) stressed the importance of elevation relative to tidal spectrum as an indicator of mangrove problems, such as erosion and inundation. Inundation, defined by the DEM variable, is probably the main factor causing mangrove dieback in Maranhão Island simulation. In addition, the resulting mangrove increment is just potential, since the pattern of peat accretion has to be higher than the rate of sea-level rise for mangrove effective colonization. Studies have also demonstrated that during the Holocene, the post-glacial sea-level rise and changes in river water discharge have been considered the main driving forces behind the expansion/contraction of mangroves in northern Brazil (Cohen *et al.* 2008; Lara & Cohen 2009, Guimarães *et al.* 2010, Smith *et al.* 2012).

In order to enhance our modeling approach, both sediment and water discharge dynamics should be

present in further versions of the conceptual model.

On Maranhão Island, the anthropic area corresponds to 48.77% of the present land use classes, estimated as approximately 43874, 81 ha, and is spread out along the island. Even without any projection of urban expansion in our modeling, impervious surfaces in areas of indiscriminate mangrove soils can prevent mangrove progress. This barrier effect can be specially observed in the north part of Maranhão Island: Sao Luis downtown is located in mangrove soils. In urban centers, modeling simulations can be helpful for the previous identification of mangrove areas sensibility to the impacts of sea-level rise merged with the influence of anthropic areas and natural barriers that can minimize the adaptive capacity of the mangrove to sea-level rise (Cahoon *et al.* 2006).

The migration and colonization process of new mangrove areas may be limited by human occupation and by natural barriers in adjacent areas (Scavia *et al.* 2002, Soares 2009, Faroco *et al.* 2010). Figure 6 shows the spatial distribution of the mangrove at the start of the simulation (Figure 6a) and after the simulation (Figure 6b), with respectively 0.1 and 1 m of sea-level rise.

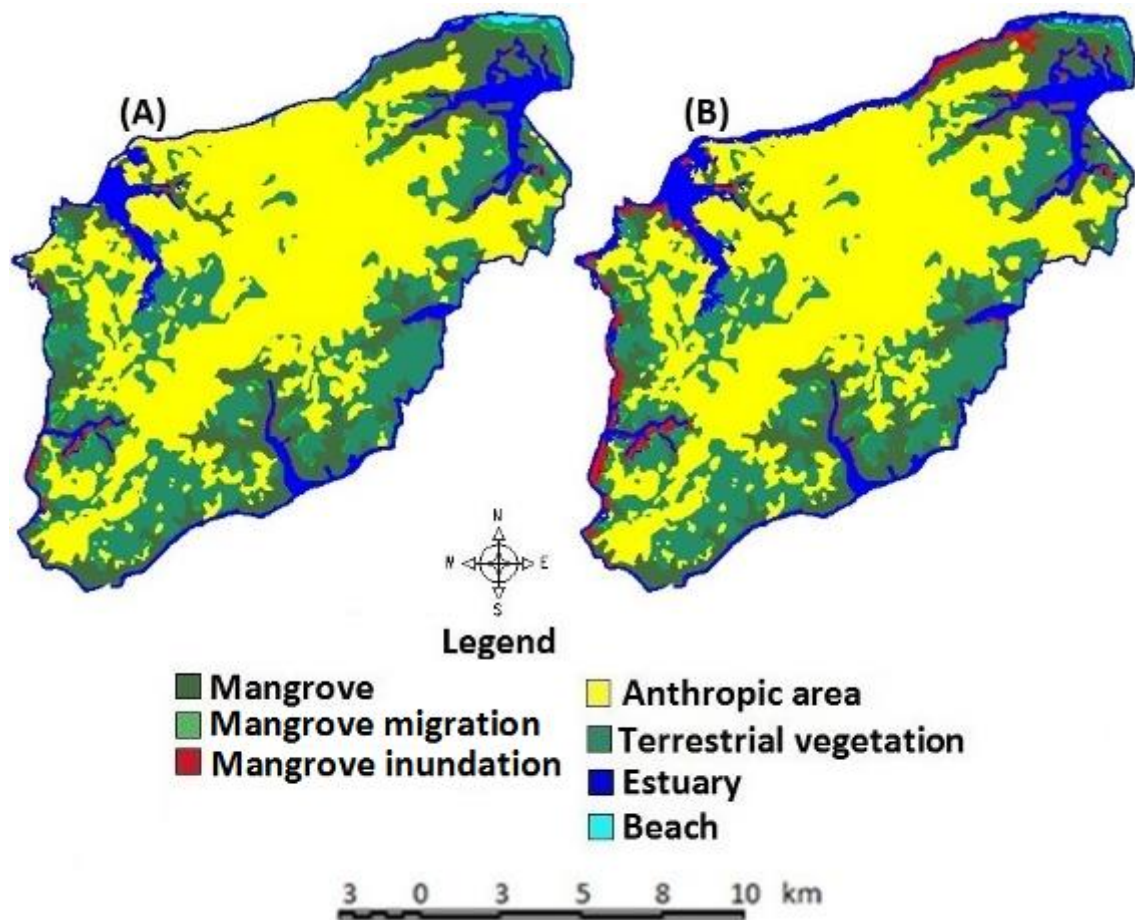


Figure 6. Land cover classes and spatial distribution of the mangrove areas on Maranhão Island: a) Situation at the start of the simulation (0.1 m of sea level); b) final land cover distribution after simulating 1 m of sea-level rise.

As expected, mangrove migrated to areas under slight influence of human activities, such as the northeast and west parts of Maranhão Island (Figure 6a), however, the topography in these areas is low, thus the expansion of new mangrove areas is superimposed by the inundation process resulting from the sea-level rise scenarios used in the present study (Figure 6b).

As supported by Berger *et al.* (2008), the use of spatially explicit

modeling can help understand the response pattern of the mangrove to climate change and to other environmental tensors. Therefore, our results are a first attempt to understand mangrove patterns of a specific study case (Maranhão Island), associated to the simplification of this complex process proposed in our conceptual model.

CONCLUSION

Using the model to simulate sea level scenarios on Maranhão Island, one could identify the mangrove responses at a specific study site. The mangrove area expanded when favored by the sea-

level rise of up to 0.3 m; however, it retracted for values of sea-level rise from 0.4 to 1 m. This result demonstrates the complexity of the mangrove response pattern to sea-level rise, especially in areas with intense anthropic presence such as the Brazilian coastal zone.

To characterize and quantify the influence of sea-level rise on mangrove, it's necessary to analyze its impacts, not only concerning the response in area (increase or reduction), but also in the spatial distribution of mangrove and in its capacity to provide products and services to coastal zone. Different adjacent land cover can act as barriers to expansion of new mangrove areas, and therefore must be included in the analysis. Population demands on mangroves should also be included in further analysis.

Modeling and simulation exercises can provide useful information to support the proposition of mitigation measures in decision-making instruments for the coastal planning in relation to climate changes, such as the Coastal Zoning. In this context, spatial explicit models based on cellular automata can be used to an early identification of areas with different degrees of sensitivity, which would allow the formulation of strategies based on local specificities for the region under analysis.

The proposed model in the present study can be applied to other study sites that have similar input database. The model can also be improved, by adding new components to model the sea-level rise impacts. For further studies of Brazilian mangroves, the model can include additional

components to encompass, for example, climate, as well as hydrological and sedimentation dynamics in order to improve the understanding of mangrove and sea-level rise relationships.

Acknowledgments: The authors of the present study are grateful to the Coordination for Improvement of Higher Level Personnel (CAPES) for the financial support, offered by means of a doctorate scholarship.

References

- Alongi, D. M. 2008. Resilience of mangrove forests, tsunamis, and global climate change. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, volume 76, issue: 1, Publisher Elsevier, 1-13.
- Berger, U., Rivera-Monroy, V. H., Doyle, T. W., Dahdouh-Guedas, F., Duke, N. C., Fontalvo-Herazo, M. L., Hildenbrandt, H., Koedam, N., Mehlig, U., Piou, C. & Twilley, R. R. 2008. Advances and limitations of individual-based models to analyze and predict dynamics of mangrove forests, **Aquat. Bot.** 89: 260-274. doi:10.1016/j.aquabot.2007.12.015.
- Bouillion, S., Rivera-Moroy, V. H. Twielly, R. R. & Kairo, J. G. .2009. **Mangroves**. In: **The management of natural coastal carbon sinks**. D.d. A. **Laffoley** and G. Grimsditch. Gland Switzerland, IUCN: 13–20.
- Cahoon, D. R, Hensel, P. F., Spencer, Reed, D. J., McKee, K. L. & Saintilan, N. 2006. Coastal wetland vulnerability to relative sea-level rise: wetland elevation trends and process controls. In: **Vhoevebn J.T.A. et al. (Eds.), Wetlands and Natural Resource Management**. Ecological Studies,

- vol. 190. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 271–292.
- Carneiro T. G. S., Andrade P. R., Câmara, G., Monteiro, A. M. V. & Pereira, R. R. 2013. TerraME: an extensible toolbox for modeling nature-society interactions. **Environmental Modelling & Software** 46: 104–117.
- Cohen, M. C. L., Lara, R. J., Smith, C. B., Matos, H. R. S. & Vedel, V. 2009. Impact of sea-level and climatic changes on the Amazon coastal wetlands during the late Holocene. **Vegetation History and Archaeobotany** 18: 425–439.
- Doyle, T. W. 2003. & Books, M. A. Chapter 12: modeling mangrove forest migration along the southwest coast of Florida under climate change. *In*: Ning, Z.H., Turner, R.E., Doyle, T.W., Abdollahi, K. (Eds.), **Integrated Assessment of the Climate Change Impacts on the Gulf Coast Region**. GRCCC and LSU Graphic Services, Baton Rouge, LA, p. 211–221.
- Doyle, T. W., Krauss, K. W., Conner, W. H. & From, A. S. 2010. Predicting the retreat and migration of tidal forests along the northern Gulf of Mexico under sea-level rise. **Forest Ecology and Management**, 259, 770–777.
- Ellison, J. C. 1993. Mangrove Retreat with rising sea-level, Bermuda. **Estuarine Coastal and Shelf Science**, 37 (1), 75–87.
- EMBRAPA - MONITORAMENTO POR SATÉLITE (Campinas, SP). 2002. **Zoneamento ecológico-econômico do Estado do Maranhão: Pedologia**. Campinas. CD-ROM. Escala 1:500.000, Formato: Arquivo de Impressão (PRT), Projeções: UTM. (ZEEMA/02/053, Pedologia).
- Faraco, L. F. D., Andriguetto-Filho, J. M. & Lana, P. C. 2010. Methodology for Assessing the vulnerability of mangroves and fisherfolk to climate change. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, 5(2): 205–223.
- Ferreira, H. O. 1988. Contribuição ao estudo das correntes de maré dos estreitos dos coqueiros e mosquitos, Maranhão. **Boletim LaboHidro** 8: 45–59.
- Field, C. 1995. Impacts of expected climate change on mangroves. **Hydrobiologia** 295, 75–81.
- França, M. C., Francisquini, M. I., Cohen, M. C. L., Pessenda, L. C. R., Rossetti, D. F., Guimarães, J. T. F. & Smith, C. B. 2012. The last mangroves Marajó Island-Eastern Amazon: Impact of climate change and/or relative sea-level changes. **Review of Palaeobotany and Palynology** 187 50–65.
- Gilman, E. L., Ellison, J. Duke, N. C. & Field, C. 2008. Threats to mangroves from climate change and adaptation options, **Aquat. Bot** 89 (2008) 237–250.
- Guimarães, J. T. F., Cohen, M. C. L., França, M. C., Lara, R. J. & Behling, H. 2010. Model of wetland development of the Amapá coast during the late Holocene. **Anais da Academian Brasileira de Ciências** 82, 451–465.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2010. **Demographic Census**. Available in <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Accessed on 23/06/13.
- IPCC. (2007): **Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the**

- Intergovernmental Panel on Climate Change.** M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden & C.E. Hanson, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 976 p.
- Kjerfve, B., Perillo, G. M. E., Gardner, L. R., Rine, J. M., Dias, G. T. M. & Rebelo-Mochel, F. 2002. Morphodynamics of muddy environments along the Atlantic coasts of North and South America. *In: Muddy Coasts Of The World: Processes, Deposits and Functions*. 1s ed., Amsterdam, Elsevier Science. pp. 479–532.
- INPE (2011). **TerraView Software copyright © 2001-2011 INPE**, Tecgraf PUC-Rio and FUNCATE.
- Lacerda, L. D., Menezes, M. O. T. & Molisani, M. M. 2007. Changes in mangrove extension at the Pacoti River estuary, CE, NE Brazil due to regional environment changes between 1958 and 2004. **Biota Neotropica**, v7 (n3): 067-072 - bn00807032007
- Lara, R. J. & Cohen, M. C. L. 2009. Palaeolimnological studies and ancient maps confirm secular climate fluctuations in Amazonia. **Climatic Change** 94, 399–408.
- Lovelock, C. E. & Ellison, J. C. 2007. Vulnerability of mangroves and tidal wetlands of the Great Barrier Reef to climate change. *In: Johnson, J.E., Marshall, P.A. (Eds.), Climate Change and the Great Barrier Reef: A Vulnerability Assessment*. Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, Australia, 237–269.
- Lowe, J. A, Howard, T., Pardaens, A., Tinker, J., Jenkins, G., Ridley, J., Office, M., Leake, J., Holt, J., Walkelin, S., Wolf, J. & Horsburgh, K. 2009. **UK Climate Projections Science Report: Marine and Coastal Projections** (Met Office Hadley Centre, Exeter, UK), 12 p.
- Lugo, Z., Sun., Wang, E., Hai, R. & Hualin, X. 2010. Modeling Productivity in Mangrove Forests as Impacted by Effective Soil Water Availability and Its Sensitivity to Climate Change Using Biome-BGC. **Ecosystems** 13: 949–965.
- McLeod, E & Salm, R. V. 2006. **Managing Mangroves for Resilience to Climate Change**. IUNC, Gland, Switzerland. 64 p.
- Miranda, E. E. (Coord.). 2005. **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Available in: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Accessed at: 5 abr. 2013.
- Miranda, L. B., Castro, B. M. & Kjerfve, B. 2002. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 411 p.
- Murray, B. C., Jenkins, W. A., Sifleet, S., Pendentlon, L. & Baldera, A. 2010. **A Payments for blue carbon: potential for protecting threatened Coastal Habitats**. Nicolas Institute Policy Brief, 9 p.
- Nellmann, C. E., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdés, De Young, C., Fonseca, F. & Grimsditch, G. (Eds). 2009. **Blue Carbon. A Rapid Response Assessment, United Nations Environment Programme**. GRID-Arendal, 67 p. ISBN: 978-82-7701-060-1, www.grida.no
- Pereira, E. D. & Zaine, J. E. 2007. Mapa geológico-geotécnico da bacia do rio Bacanga - São Luís (MA). **Geociências**, v. 26, n. 1: 45-54.

- Rebello-Mochel. 2003. **Zoneamento Costeiro do Estado do Maranhão**. Coord. (a). Rebello-Mochel, F. Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), CD-ROOM.
- Scavia, D., Field, J. C., Boesch, D. F., Buddemeier, R. W., Burketi, V., Gayan, D. R., Fogarty, M., Herwell, M. A., Howarth, R. W., Mason, C., Reed, D. J., Royer, T. C., Sallenger, A. H. & Titus, J. G. 2002. Climate change impacts on mangroves U.S. coastal and marine ecosystems. **Estuaries** 25: 149–164.
- Schaeffer-Novelli Y, Cintró-Molero, G. Soares, M. L. G. & De-Rosa, T. 2000. Brazilian mangroves. **Aquatic Ecosystem Health and Management** Volume 03, Issue 4, 561-570.
- Schaeffer-Novelli Y, Cintron-Molero, G. & Soares, M. L. G. 2002. Mangroves as indicators of sea-level change in the muddy coasts of the world. *In*: Wang, Y. and Healy, T. (eds.), **Muddy Coasts. United Kingdom**: Elsevier: 245-262.
- Silva Junior, M. G., Castro, A. C. L., Soares, L. S. & França, V. L. 2007. Relação Peso-comprimento de Espécies de Peixes do Estuário do Rio Paciência da Ilha do Maranhão, Brasil. **Boletim do Laboratório de Hidrobiologia**, 20: 31-38.
- Soares, M. L. G. 2009. A conceptual model for responses of mangrove forest to sea level rise. **Journal of Coastal Research**, especial issue 56: 267-271.
- Solomon, S., M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden & C.E. Hanson (Eds.), 2007. Climate Change: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 447.
- Solomon, S., Plattner, Gian-Kasper., Kinutt. & Friedlingstein, P. 2009. Irreversible Climate Change Due to Carbon Dioxide Emissions. **Proct. Natl. Acad. Sci. U.S.A.** 106 (6): 1704-1709.
- Souza-Filho, P. W. M. 2005. Costa de Macromaré da Amazônia: Cenários Morfológicos, Mapeamento e Quantificação de Áreas Usando Dados de Sensores Remotos. **Revista Brasileira de Geofísica** 23 (4): 427-435.
- Smith, C. B., Cohen, M. C. L., Pessenda, L. C. R., França, M. C. & Guimarães, J. T. F. 2012. Holocene proxies of sedimentary organic matter and the evolution of Lake Arari- Northern Brazil. **Catena** 90: 26–38.
- Spalding, M., Kainuma, M. & Collins, L. 2010. **World mangrove atlas**. London, Washington D. C. ISBN 978-1-84407-657-4. 319 p.
- UEMA. 2000 – **Atlas do maranhão/gerência de planejamento e desenvolvimento econômico**, laboratório de geoprocessamento/Universidade Estadual do Maranhão (LABGEO/UEMA). São Luis: GEPLAN, 36 p.
- UNEP-WCMC. 2006. **In the Front Line: Shoreline Protection and Other Ecosystem Services from Mangroves and Coral Reefs**. United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre, Cambridge, UK. 36 p.
- Wolfram, S. 1983. Statistical mechanics of cellular automata. **Reviews of**

Modern Physics, Vol. 55, No. 3:
602-644.

Impactos da Elevação do Nível Médio do Mar sobre o Ecossistema Manguezal: a Contribuição do Sensoriamento Remoto e Modelos Computacionais

Impacts of Sea-Level Rise over the Mangrove Ecosystem: the Contribution of Remote Sensing and Computer Models

Resumo

O processo de mudança climática resultante das atividades humanas é muito provável e dentre suas consequências, a elevação do nível médio do mar é a maior preocupação para as zonas costeiras. Devido sua posição entre o mar e o continente, o ecossistema manguezal é particularmente vulnerável às variações do mar. No Brasil há um grande desafio no que se refere ao entendimento do padrão de resposta do manguezal a elevação do nível do mar, uma vez que a Amazônia Legal tem a maior área contínua de manguezal do planeta e o país ainda apresenta a segunda maior área total de manguezal do mundo. O presente estudo tem como objetivo discutir duas abordagens metodológicas que podem ser úteis para estudar os impactos da elevação do nível médio do mar sobre o ecossistema manguezal. As ferramentas metodológicas discutidas são: o sensoriamento remoto e modelos computacionais. Respectivamente, estas metodologias contribuem para mapeamento de florestas de mangues e simulação do padrão de resposta do manguezal a eventuais cenários de elevação do nível do mar. Ambas as abordagens metodológicas possuem vantagens e desvantagens, e podem ser utilizadas de forma conjunta para uma melhor compreensão dos impactos ao ecossistema manguezal.

Palavras-chave: Mudança climática, elevação do nível do mar, manguezal, sensoriamento remoto, modelos computacionais.

Abstract

The process of climate change resultant of human activity is very likely and among its consequences, the sea-level rise is the biggest concern for coastal zones. Due to its position between the sea and the continent, the mangrove ecosystem is particularly vulnerable to variations of the sea. In Brazil there is a big challenge with regard the understanding of the pattern of mangrove response to sea-level rise, since the Legal Amazon has the largest continuous area of mangrove of the planet, and the country still has the second largest area of mangrove forest of the world. The present study aims to discuss two methodological approaches that may be useful to study the impacts of sea-level rise over mangrove ecosystem. The methodological tools discussed are: remote sensing and computational models. Respectively, these methodologies contribute to mapping of mangrove forests and simulation of the mangrove's response pattern to eventual scenarios of sea-level rise. Both of these the methodological approaches have advantages and disadvantages, and can be used jointly for a better understanding of the impacts to the mangrove ecosystem.

Keywords: Climate change, sea-level rise, mangrove, remote sensing.

INTRODUÇÃO

O processo de aquecimento do sistema climático decorrente das atividades humanas é muito provável (IPCC, 2007; 2013). Um efeito característico das mudanças climáticas na zona costeira é o fenômeno de elevação do nível médio relativo do mar (NMRM).

Dentre os impactos das mudanças climáticas, o manguezal é particularmente vulnerável ao processo de elevação do nível do mar (FIELD, 1995; LOVELOCK e ELLISON, 2007; FARACO, ANGRETO-FILHO e LANA, 2010; GIRI et al., 2011). Contudo, o padrão de resposta do manguezal à elevação do nível do mar é dependente das características geográficas, oceanográficas e ambientais, nas escalas local e regional (GILMAN et al., 2006), assim como, também, da capacidade adaptativa das espécies

vegetais do manguezal (ESPINOSA e FLORES, 2011). Fato que indica a complexidade e a necessidade de haver pesquisa abordando à temática.

Pela expressiva área de ocorrência de manguezal no Brasil, entender os impactos das mudanças climáticas para articulação de medidas de preservação e mitigação é um grande desafio. Segundo SCHAEFFER-NOVELLI et al. (2000), a área de distribuição de manguezal em território brasileiro vai da fronteira com a Guiana Francesa, logo acima da linha do Equador (04° 30' N) até o estado de Santa Catarina (28° 30' S). A maior área continua de manguezal do planeta encontra-se na Amazônia Legal (SOUZA-FILHO, 2005), com aproximadamente 8.900 km² (KJERFV et al., 2002). Em termos de área total de manguezal, o Brasil é segundo país no mundo (SPALDING, KAINUMAAND e

COLLINS, 2010; GIRI et al., 2011) com área estimada em 13.000 km² (SPALDING, KAINUMA AND e COLLINS, 2010).

Tomando-se por base a área de manguezal no Brasil, entender os impactos das mudanças climáticas para articulação de medidas de preservação/conservação e mitigação é imprescindível. Poucos estudos têm sido direcionados para compreender e simular o padrão de resposta do manguezal às alterações climáticas em território brasileiro, entre estes é possível mencionar: Soares (2009) que desenvolveu um modelo conceitual que indica os potenciais impactos da elevação do mar no ecossistema manguezal; e FARACO, ANGRETO-FILHO e LANA (2010) que formularam uma metodologia para estimar o grau de vulnerabilidade do manguezal e populações de pescadores aos impactos oriundos da alteração no clima.

Além da importância em área de ocorrência e pela pouca produção científica brasileira para a temática em questão, estudar o manguezal no contexto das implicações climáticas se justifica pela forma secundária que este ecossistema tem sido submetido nos fóruns de mudanças no clima (NELLMAN et al., 2009).

Com base no conhecimento científico existente, através do presente estudo objetiva-se apresentar potenciais abordagens metodológicas de análises e monitoramento para entendimento do padrão de resposta do ecossistema manguezal à elevação do nível do mar.

Inicialmente faz-se uma análise dos possíveis impactos da elevação do nível do mar sobre o manguezal. E posteriormente,

apresentam-se abordagens metodologias que podem ser utilizadas para avaliação das respostas do manguezal em relação ao processo de elevação do nível do mar, enfocando especificamente as ferramentas disponíveis em sensoriamento remoto e no uso da modelagem computacional.

PROCESSO DE ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR E A DINÂMICA DO ECOSISTEMA MANGUEZAL

Os sistemas terrestres têm evidenciado sinais das alterações no clima (IPCC, 2007), podendo-se mencionar, entre outras: (i) a média global do nível do mar subiu em uma taxa de 1,8 mm entre 1961 e 2003; (ii) observações realizadas desde 1961 mostram que a temperatura média do oceano aumentou em profundidades de até 3.000 m; (iii) o oceano tem absorvido mais de 80% do calor acrescentado ao sistema climático. Pesquisas mais recentes, como a de SOLOMON et al. (2010) indicam que a gravidade das mudanças climáticas induzidas pelas emissões de dióxido de carbono (CO₂)¹¹ oriundas das atividades antrópicas é irreversível por pelo menos 1.000 anos, mesmo se cessadas as atuais taxas de emissões. Isso porque a diminuição de CO₂ na atmosférica diminui o forçamento radiativo¹², contudo, tal

¹¹ Principal gás de efeito estufa de origem das atividades humanas, “uso de combustíveis fósseis e das formas de uso e cobertura do solo” (IPCC, 2007; 2013).

¹² O forçamento radiativo é uma medida da influência de um fator na alteração do equilíbrio da energia que entra e sai do sistema Terra-atmosfera. É um índice da importância do fator como possível

processo é compensado pelo lento processo de expansão térmica dos oceanos.

A elevação do NMRM durante o século XX variou de 0,12 m a 0,22 m (IPCC, 2007). Outras projeções indicam que a elevação do NMRM pode oscilar de 0,26 m a 0,59 m até a última década do século XXI (SOLOMON et al., 2007). O quinto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC-AR5) levando em consideração observações realizadas entre 1986 a 2005, indica que a taxa de elevação média global do mar pode variar de 0,45 a 0,81 m até as duas últimas décadas do século XXI (IPCC, 2013).

Os impactos das mudanças climáticas que afetam o manguezal incluem elevação do nível do mar (CAHOON et al., 2006; GIRI et al., 2011), alterações na temperatura (GILMAN et al., 2008), na ocorrência de furacões (DOYLE et al., 2003), na incidência de precipitação (MCLEOD e SALM, 2006; ALONGI, 2008), nas taxas de concentrações de CO₂ (MCLEOD e SALM, 2006), alterações no padrão de circulação oceânica (GILMAN et al., 2008; SOARES 2009) e até nas respostas humanas¹³ às alterações no clima (GILMAN et al., 2008).

O manguezal é particularmente suscetível ao processo de elevação do nível do mar (FIELD, 1995; LOVELOCK e ELLISON, 2007). Contudo, o ecossistema manguezal apresenta resiliência a este processo (GILMAN et al., 2006), sobretudo os manguezais localizados em locais submetidos a elevada variação de maré e que não possuam baixo relevo (MCLEOD e SALM, 2006) e também, a resposta do manguezal pode apresentar diferenças de um local para outro, como consequência de características locais e regionais onde o mesmo ocorra, tais como: padrões locais nas taxas da elevação do nível do mar e nos processos de sedimentação/erosão (ALONGI 2008; GILMAN et al., 2008), assim como, da altura de maré local, topografia do relevo e das formas de uso e ocupação do solo adjacentes ao manguezal (MCLEOD e SALM, 2006), fato que evidencia a complexidade inerente à temática.

Há três cenários gerais que definem o padrão de resposta do manguezal no que tange possíveis alterações no NMRM (GILMAN et al., 2006), a saber: (i) cenário de não elevação, (ii) retração do NMRM e (iii) elevação do NMRM; tendo-se em consideração uma escala local/região e um período de tempo da ordem de décadas ou mais (Figura1).

mecanismo de mudança do clima. O forçamento positivo tende a aquecer a superfície, enquanto o forçamento negativo tende a esfriá-la (IPCC, 2007).

¹³ Entende-se por “respostas humanas”, obras de engenharia (diques, processo de canalização, etc.) construídas com intuito de minimizar os impactos das mudanças climáticas e que podem ocasionar impactos negativos ao manguezal (GILMAN et al., 2008).

Cenário de não elevação – Quando não há aumento do nível do mar em relação à superfície de ocorrência do manguezal. Neste cenário, não há alterações significativas na estrutura ecossistêmica local do manguezal (alteração na área, por exemplo), a ocorrência e distribuição das espécies de angiospermas características do

manguezal são condicionadas pelo processo de zonação pré-existente no local. Figura 1a;

Retração do NMRM – Quando ocorre retração do NMRM em relação à superfície de ocorrência do manguezal. Para este cenário, o manguezal pode ocupar áreas que outrora estavam submersas, e dependendo da topografia, o manguezal também pode expandir lateralmente. Figura 1b;

Aumento do NMRM – Quando ocorre aumento do NMRM em relação à superfície

de ocupação do manguezal. Neste cenário pode haver inundação permanente e erosão de áreas ocupadas pelo manguezal, deslocamento da área de influência das marés, o que pode ocasionar perdas de diversidade biológica em decorrência de alterações no hidroperíodo e na zonação das espécies vegetais do manguezal, e pode ocorrer também, migração do manguezal em direção ao continente, caso não existam barreiras à sua colonização (ex. construções antrópicas). Figura 1c.

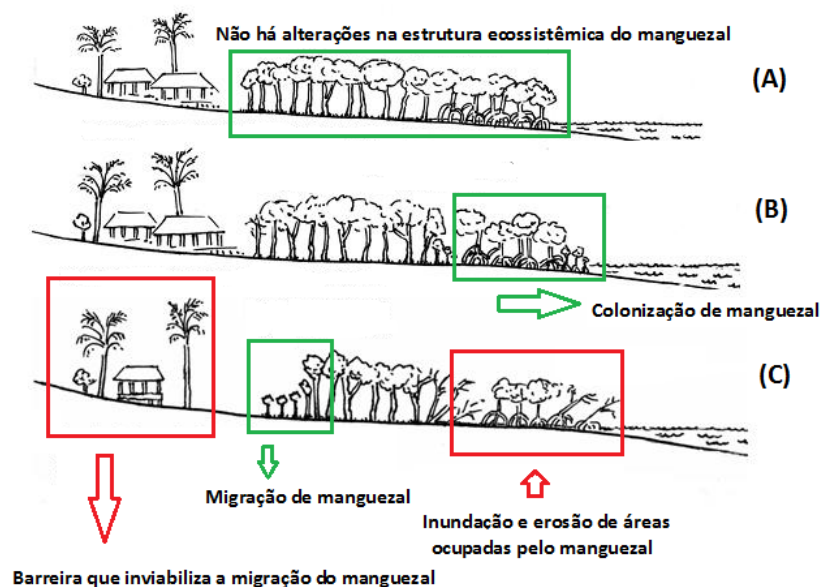


Figura 1. Cenários para o padrão geral de resposta do manguezal a alterações no NMRM: (A) – Cenário de não elevação; (B) – Cenário de retração e (C) – Cenário de elevação.

Fonte: adaptado de GILMAN et al. (2006)

Para o cenário de elevação do NMRM, que é o foco da presente pesquisa, o manguezal pode sofrer diferentes alterações ambientais, tais como modificação na área de ocorrência (aumento ou diminuição), migração para áreas adjacentes, ou ainda

tornar-se suscetível à perda de diversidade biológica, o que pode comprometer os bens e serviços usualmente oferecidos pelo manguezal à zona costeira (MCLEOD e SALM, 2006; FIELD, 1995; LOVELOCK e ELLISON, 2007).

A perda de diversidade biológica pode ocorrer porque a distribuição das espécies do manguezal (zonação) responde ao gradiente das marés em relação ao relevo local (LUGO, 1980), do ponto de menor valor (baixamar) até o patamar das maiores marés (preamar), a denominada área de influência das marés (AIM). Com a elevação do mar pode haver o deslocamento da AIM, e com isso o padrão inicial da zonação das espécies pode ser alterado, com possíveis mudanças na diversidade biológica, pois algumas espécies podem adaptar-se melhor que outras (AGRAWALA et al., 2003).

Ao modificar o padrão das marés, alterações no nível do mar podem também modificar o processo de sedimentação principalmente de sedimentos finos que são transportados em suspensão na coluna d'água através da ação das marés. Podendo favorecer assim a acreção de sedimento, fato que propicia aumento do substrato lamoso, o que pode favorecer a expansão do manguezal (BATISTA et al., 2008). Além da influência nos padrões de circulação de massas d'água e do transporte de sedimentos, as taxas de sedimentação podem depender também do sistema radicular de cada espécie de manguezal presente (CAHOON et al., 2006).

Por responder à dinâmica do NMRM, o ecossistema de manguezal tem sido sugerido como indicador do processo de elevação do nível do mar (SCHAEFFER-NOVELLI, CONTRÓN-MOLERO e SOARES, 2002). Outra possível resposta é a migração do manguezal para áreas adjacentes, quando a elevação do nível do mar propicia o aumento da entrada de água salgada em rios e estuários (SOARES 2009). Contudo, o processo de migração depende das formas

de uso e ocupação do solo em áreas marginais ao manguezal, principalmente as de origem antrópica, que podem atuar como barreiras à colonização de novas áreas (MCLEOD e SALM, 2006; FARACO, ANGRETO-FILHO; LANA, 2010).

A elevação do nível do mar pode também propiciar redução de áreas de manguezal como observado por LARA e COHEN (2003). No município de Bragança, estado do Pará, os autores analisaram a taxa de retração de área do manguezal na área de estudo por influência da invasão de areia transportada pela coluna d'água que ao cobrir as camadas de lama causavam asfixia das raízes do manguezal. De acordo com os autores, a perda da cobertura vegetal do manguezal correspondeu a um padrão associado a uma tendência de longa duração, compatível com as taxas de elevação do nível do mar descritas pela literatura. O manguezal também pode perder área quando de um lado o manguezal é submerso e/ou sofre com a erosão proveniente da elevação do NMRM e do outro, o mesmo não encontra condições adequadas à colonização em áreas circunvizinhas (Figura 1c).

A elevação do nível do mar aliada a alterações nas taxas de precipitação podem também modificar a salinidade do estuário, com consequências para a manutenção do manguezal. O aumento excessivo de salinidade pode ocasionar a morte de indivíduos vegetais ou sua adaptação às novas condições (AGRAWALA et al., 2003).

Além dos processos relacionados à elevação do nível do mar como inundação, transporte de sedimento e mudanças na salinidade, alterações nos processos de circulação oceânica também podem causar impactos

ao manguezal. Porém estes são pouco descritos na literatura, o que reflete uma lacuna significativa de conhecimento em relação ao entendimento do padrão de resposta do manguezal às alterações climáticas (ALONGI, 2008).

Embora o manguezal seja aparentemente um ecossistema simples em termos de diversidade de espécies vegetais, sua ecologia é extremamente complexa (LUGO e SNEDAKER, 1974). Inúmeras interações existem entre o manguezal e os sistemas oceânico, continental, atmosférico e até mesmo antrópico podem ser alteradas pelas mudanças climáticas, sobretudo pela elevação do NMRM: (i) a dinâmica da geofísica das marés que tem variações de horas, dias e até mesmo de meses, com reflexo direto na zonation de espécies de mangues; (ii) o aporte de água doce que ocorre mediante a ação da precipitação e da descarga de rios e água subterrânea influencia na entrada de sedimentos e nutrientes que chegam ao ecossistema; (iii) a influência das correntes marinhas determinam a deposição de sedimentos, nutrientes e o aporte de água salgada; (iv) formas de usos antrópicos diretos e indiretos podem proporcionar maior ou menor grau de vulnerabilidade ao manguezal, uma vez que as construções humanas na zona costeiras podem causar impactos ao manguezal, e também, podem se constituir como barreiras a colonização de novas áreas de manguezal.

MÉTODOS DE ANÁLISE E MONITORAMENTO PARA ÁREAS DE MANGUEZAIS IMPACTADAS PELA ELEVÇÃO DO NÍVEL DO MAR

Devido à natureza complexa das relações ecológicas do manguezal com seu meio físico-climático mencionado no parágrafo acima, pode-se inferir que o diagnóstico de impactos da elevação do nível do mar não é procedimento trivial, fato que evidencia a necessidade de haver uma abordagem multidisciplinar. Neste contexto, apresenta-se a seguir duas abordagens metodológicas possíveis para análise do manguezal na busca de uma melhor compreensão das respostas do mencionado ecossistema: uso de dados e técnicas de sensoriamento remoto e o uso de modelos computacionais.

Contribuição do Sensoriamento Remoto

Os últimos relatórios de avaliação das mudanças no clima do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC têm demonstrado a importância do uso de imagens de satélites para mensuração da elevação do NMRM em todo o planeta, assim como os potenciais impactos para a zona costeira mundial (IPCC, 2007; 2013). No que tange especificadamente os impactos da elevação do nível do mar sobre o ecossistema manguezal, o sensoriamento remoto pode, por exemplo, ser utilizado na mensuração de alterações na sua área de ocorrência como resposta às alterações no avanço do mar sobre o continente (LARA e COHEN, 2003, por exemplo).

A ferramenta de sensoriamento remoto em estudos direcionados ao ecossistema manguezal pode ser utilizada em distintas escalas (espacial, temporal e espectral) e para várias utilidades, tais como: mapeamento de áreas de ocorrência, mensuração da área foliar, identificação do padrão de resposta espectral das distintas

espécies, confecção de mapas de espécies que compõem os bosques de mangues e estimacão de biomassa (HEUMANN, 2011; KUENSER et al., 2011).

Os dados ópticos mais utilizados em estudos de bosques de mangues são os provenientes de aerofotogrametria e dados orbitais de media e alta resolução como as imagens Landsat e SPOT (NEWTON et al., 2009). Segundo HEUMANN (2011) algumas técnicas de sensoriamento remoto mais frequente em pesquisas cujo objeto

analisado é o manguezal são: interpretação visual, classificação digital, classificação não supervisionada, classificação supervisionada, classificação híbrida, classificação espectral e índices espectrais de vegetação. A Figura 2 apresenta um exemplo de mapeamento de manguezal por sensoriamento remoto com auxílio da técnica de classificação híbrida.

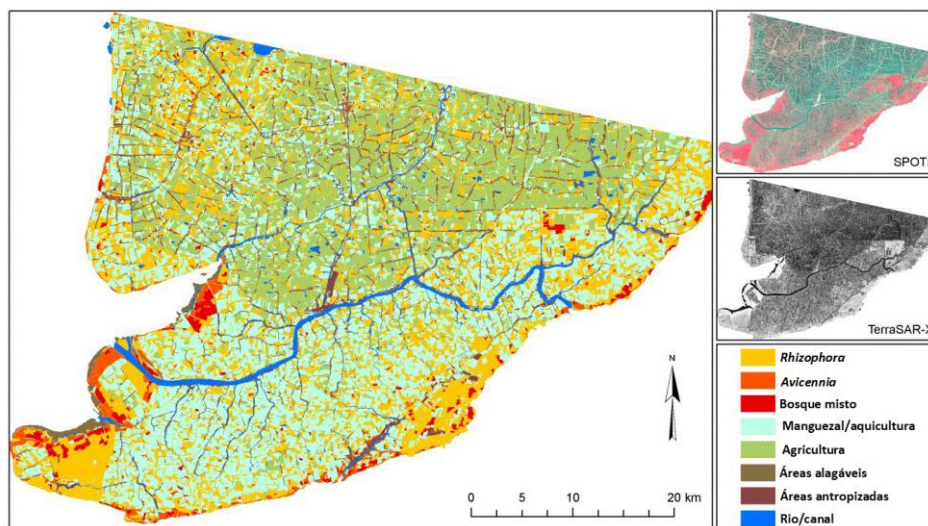


Figura 2 - Exemplo de mapeamento de áreas de manguezal utilizando o método de classificação híbrida com imagens SPOT 5 e dados de TerraSAR-X para a província Ca Mau no Vietnã (2010). Baseados em dois conjuntos de dados: composição de espécies e diferentes formas de uso e ocupação em áreas de ocorrência de manguezal.

Fonte: KUENSER et al. (2011)

Além de mapeamento, o uso de técnicas de sensoriamento remoto tem permitido mensurar outros parâmetros importantes para a compreensão das interações do manguezal com os sistemas físico-climáticos adjacentes, como nos casos das estimativas de carbono, áreas foliar, biomassa,

identificação de espécies e altura do dossel (RASOLOFOHARINORO et al., 1998; KOVACS, WANG e FLORES-VERDUGO, 2005; FATOYINBO et al., 2008; HUANG, ZHANG e WANG, 2009) .

Muitos podem ser os usos da ferramenta de sensoriamento remoto, conduzido a referida abordagem metodológica pode apresentar

algumas desvantagem/limitações, tais como: presença de nuvens, no caso de imagens ópticas, que podem prejudicar a qualidade das imagens; eventual falta de recursos humanos qualificados; em alguns casos, possíveis custos elevados para aquisição de equipamentos e softwares específicos. Outro potencial fator limitante reside no fato que o sensoriamento remoto é adequado para identificação dos “efeitos externos” dos impactos da elevação do mar (diminuição da área de manguezal, por exemplo), mas não consegue fornecer informações detalhadas sobre eventuais alterações ecológicas (ex.: processo de sucessão ecológica).

As vantagens do uso do sensoriamento remoto encontram-se na versatilidade de dados disponíveis em diferentes escalas para mapear o manguezal; na comodidade e na economia de tempo, pois tendo acesso às imagens, o pesquisador pode mensurar alterações no manguezal em diferentes anos do seu próprio laboratório; na grande disponibilidade de imagens de baixa, média e de alta resolução para todo o mundo e pela existência dados de diferentes naturezas, como imagens de radar que ampliam a capacidade de detectar características específicas dos bosques de mangue.

Outra vantagem que pode ser conferida à utilização do sensoriamento remoto reside no fato que com o seu uso é possível obter/mensurar dados reais de uma determinada área em estudo e com isso, é possível obter um registro histórico da área de ocorrência do manguezal. Fato que pode subsidiar pesquisas mais específicas que possam promover uma melhor

compreensão do (s) fator (es) que pode (m) ocasionar eventuais alterações na área de manguezal presente em um determinado local.

Contribuição da Modelagem Computacional

O uso de modelagem computacional constitui-se como uma ferramenta útil para entendimento dos impactos da elevação do nível do mar no manguezal, considerando-se duas aplicações principais: a simulação do padrão de resposta do manguezal frente aos impactos da elevação do nível do mar, antes mesmos que estes se manifestem em uma determinada área e a simulação de potenciais alterações nos processos ecológicos.

Berger et al. (2008) sustentam que a abordagem da modelagem é adequada para avaliar simultaneamente os efeitos das mudanças ambientais e alterações nos processos ecológicos tais como recrutamento, estabelecimento, crescimento, produtividade e mortalidade de indivíduos arbóreos. Em seu estudo são discutidos três modelos - FORMAN, KIWI e MANGRO, parametrizados¹⁴ para avaliar a dinâmica do manguezal conforme descrito pela literatura para espécies de mangues neotropicais (BERGER; HILDENBRANDT, 2000; DOYLE, GIROD; BOOKS, 2003; BERGER et al., 2006).

Os modelos FORMAN, KIWI e SELVA MANGRO são modelos baseados em

¹⁴ Parametrização é um processo de obtenção de aproximações matemáticas que possam minimamente descrever o comportamento de determinadas variáveis ecossistêmicas (SANDS e LANDSBERG, 2002).

indivíduos (MBI). Os MBI's por serem considerados como ferramentas adequadas para simular a variabilidade de plantas ou de animais e suas influências em sistemas naturais, tornaram-se amplamente aceitos em estudos de ecologia numérica na década de 90 (GRIMM, 1999; DEANGELIS; MOOIJ, 2005). Nestes modelos, há integração hierárquica em diversos níveis de processos ecológicos que podem ser parametrizados diretamente e de forma relativamente simples. Além disso, os MBI's podem ser projetados para funcionar em diferentes escalas temporais e espaciais.

Tanto o FORMAN, KIWI, como o SELVA MANGRO foram desenvolvidos para o entendimento de florestas de mangues em diferentes condições ambientais e de manejo. Os três modelos foram parametrizados para características biológicas e fisiológicas de três espécies de mangues neotropicais: *Rhizophora mangle* (mangue vermelho), *Avicennia germinans* (mangue preto) e *Laguncularia racemosa* (mangue branco). Os modelos FORMAN e

KIWI são mais robustos para a simulação da dinâmica dos bosques de mangues, utilizados para descrever processos ecológicos e de estrutura do manguezal (BERGER e HILDENBRANDT, 2000; BERGER et al., 2006; BERGER et al., 2008). Enquanto o SELVA MANGRO é mais direcionado à simulação da dinâmica de paisagem e para grandes escalas espaciais, sendo pra isso conectado a um banco de dados geográfico.

Dentre os três modelos mencionados nos parágrafos acima, apenas o MANGRO foi utilizado para simular o padrão de resposta do manguezal às mudanças climáticas, mais precisamente para avaliar os impactos de furacões (DOYLE; GIROD, 1996) e do processo de elevação do nível do mar (DOYLE, GIROD e BOOKS, 2003), Figura 3.

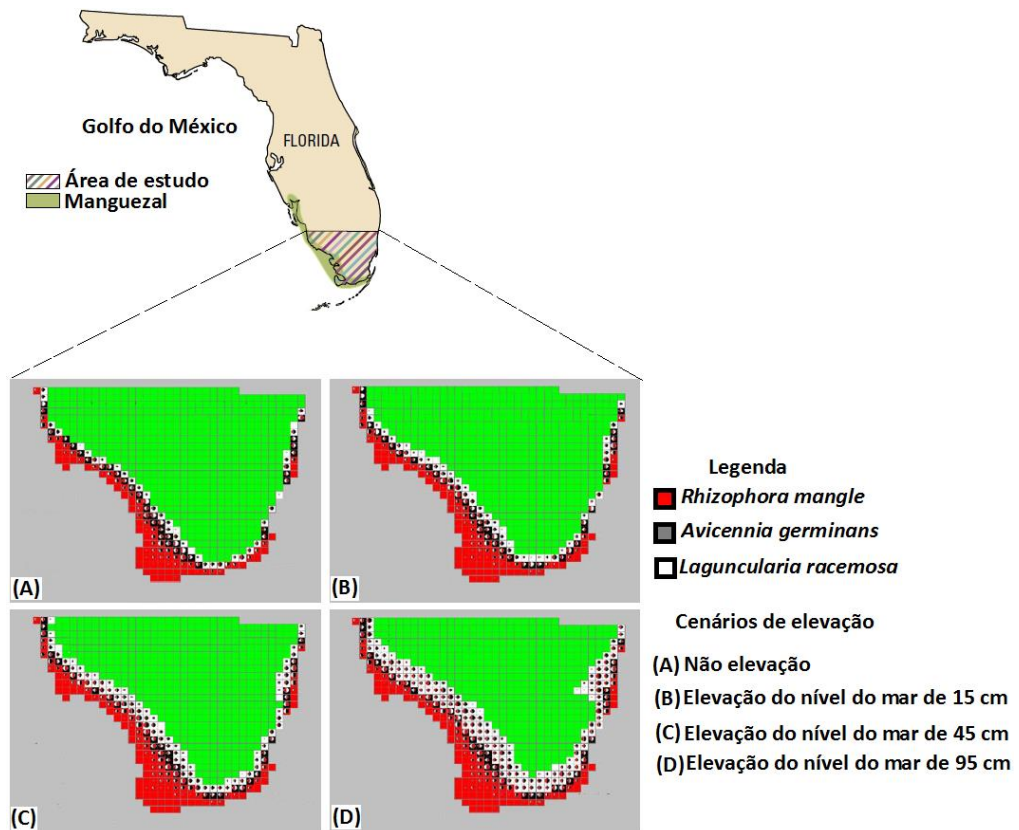


Figura 3. Modelo SELVA MANGRO sendo utilizado para simulação de processos de sucessão ecológica para três espécies de mangues como resposta a diferentes cenários de elevação do nível do mar no sul da Flórida/EUA.

Fonte: Adaptado de DOYLE, GIROD e BOOKS (2003).

A Figura 3 evidencia um exemplo de utilização do SELVA MANGRO para a simulação de possíveis alterações na composição de três espécies de manguezais no sul da Flórida/EUA como resposta a um cenário de elevação do nível do mar que oscila de 0,15 a 1,1 m, tendo-se por base um período de tempo de 1940 até meados de 2100. Em estudos como o apresentado na Figura 3 é possível se antecipar aos possíveis impactos negativos ao manguezal (perda de diversidade biológica, por exemplo), e com isso, medidas mitigadoras podem ser idealizadas pelos tomadores de decisão de forma antecipada, fato que evidencia a relevância do uso da modelagem computacional para a temática abordada.

A modelagem computacional, ao simular os impactos da elevação do nível do mar, tende a possibilitar o diagnóstico antecipado do padrão de resposta do manguezal. Como em um laboratório virtual pode-se, por exemplo, simular alterações na salinidade, no deslocamento da AIA, nas taxas de transporte de sedimento, nos processos de sedimentação e erosão e em possíveis alterações no aporte de sedimento, e com isso, é possível se inferir sobre o padrão de resposta do manguezal à elevação do nível do mar, tendo-se por base além da questão climática, as características geográficas e ambientais da região que o manguezal coloniza, assim como, também, de áreas adjacentes que podem atuar como barreiras ou como áreas aptas a serem colonizadas quando houver variação do NMRM (ver Figura 1).

Em termos de limitações é possível mencionar que por mais que seja sofisticado

um modelo computacional, este trata-se apenas de uma simplificação do sistema ecológico em estudo e em muitos casos a falta de dados de campo ou ainda a distribuição rara e/ou pontual dos mesmos, dificulta um processo de parametrização eficiente, o que pode reduzir a capacidade preditiva (generalidade) e a aderência à realidade, ou seja, o resultado obtido sempre será apenas uma simulação e não um dado medido. Além disso, a complexidade da dinâmica dos processos ecológicos do manguezal com o meio físico onde o mesmo ocorre pode dificultar a formulação de artifícios matemáticos de simplificação para os procedimentos de modelagem, podendo comprometer assim o caráter de precisão dos modelos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O manguezal é um ecossistema costeiro vulnerável ao fenômeno de elevação do nível do mar, devido sua localização entre o mar e o continente. Neste contexto, há no Brasil um grande desafio haja vista sua extensa área de manguezal, principalmente na maior área contínua de manguezal do planeta, situada no perímetro da Amazônia Legal brasileira, assim como, também, devido a pouca produção científica brasileira voltada para a antecipação e prevenção dos potenciais impactos do aumento do nível do mar.

Foram apresentadas duas abordagens metodológicas para estudo do manguezal frente à ameaça da elevação do nível médio do mar: o sensoriamento remoto e a modelagem computacional. Todas duas apresentam potenciais distintos e complementares para fornecer informações

e/ou dados que podem subsidiar atividades que visem avaliação e recuperação dos impactos decorrentes do processo de elevação do nível do mar. Apesar de fundamentadas em premissas distintas, estas abordagens podem ser utilizadas de modo complementar para o acompanhamento e até antecipação à ocorrência dos possíveis impactos.

Ambas as metodologias apresentam vantagens e desvantagens/limitações no caso do sensoriamento remoto as vantagens residem na grande disponibilidade de dados, na versatilidade de escalas que podem ser adotadas (temporal, espectral e espacial), na possibilidade de se obter dados reais (medidos), etc. Limitações e/ou desvantagem podem ser observadas no que se refere a eventuais custos elevados para aquisição de imagens e softwares específico, possível falta de recursos humanos qualificados, dentre outros.

O uso da modelagem também apresenta desvantagens e potencialidades, entre os aspectos positivos pode-se mencionar: a possibilidade de se antecipar a ocorrência do impacto, simular alterações na área de manguezal e em seus processos ecológicos, simular o padrão de resposta dos distintos bosques de mangues, etc. Em termos de desvantagens é possível mencionar que o resultado obtido sempre será uma simulação e não um dado medido, a eventual falta de dados locais que podem fragilizar a parametrização do modelo, a dificuldade de se obter simplificação matemática dos processos ecológicos do ecossistema manguezal, etc.

Com intuito de minimizar as desvantagens e maximizar as potencialidades, ambas as abordagens metodológicas podem ser utilizadas de forma conjunta. Como exemplo de uma abordagem complementar entre as duas ferramentas discutidas, pode-se mencionar um cenário onde um manguezal de uma determinada área foi impactado por sucessivos cenários de elevação do nível do mar ao longo de certo período de tempo. Neste caso, o sensoriamento remoto pode ser utilizado para mensurar a variação de área do manguezal que historicamente existia na área analisada. Com base nos dados disponibilizados pelo sensoriamento remoto, pode-se inferir o estado de ocupação dita “normal” do manguezal, e com este cenário de ocupação inicial, potenciais alterações no manguezal podem ser simuladas através do uso da modelagem computacional, como exemplo de estudo já realizado neste contexto pode-se mencionar a pesquisa de DI NITTO et al. (2013), onde os autores utilizaram mapeamentos pré-existentes do manguezal que serviram de base para os procedimentos de simulação computacional na área de estudo para distintos cenários de elevação do nível do mar.

AGRADECIMENTO

Os autores do presente estudo agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado que subsidiou apoio financeiro em todas as etapas da pesquisa, cujo um dos resultados é o presente artigo.

REFERÊNCIAS

AGRAWALA, S. et al. **Development and Climate Change In Fiji: Focus on Coastal Mangroves**. COM/ENV/EPOC/DCD/DAC, 56 p, 2003.

ALONGI, D. M. Resilience of Mangrove Forests, Tsunamis, and Global Climate Change. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, volume 76, issue: 1, Publisher Elsevier, p. 1-13, 2008.
doi:10.1016/j.ecss.2008.08.024.

BATISTA, E. M.; SOUZA-FILHO, W.M.; SILVEIRA, O. F. M. Avaliação de Áreas Depositionais e Erosivas em Cabos Lamosos da Zona Costeira Amazônica Através da Análise Multitemporal de Imagens de Sensores Remotos. **Revista Brasileira de Geofísica**, 27 (supl.1): p. 83-86, 2009.

BERGER, U.; HILDENBRANDT, H. A New Approach to Spatially Explicit Modelling of Forest Dynamics: Spacing, Ageing and Neighborhood Competition of Mangrove trees. **Ecological Modelling**. 132: p. 287–302, 2000.

BERGER, U. et al. Modelling Secondary Succession of Neotropical Mangroves: Causes and Consequences of Growth Reduction in Pioneer Species. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**. 7: p. 243-252.
doi:10.1016/j.ppees.2005.08.001, 2006

BERGER, U. et al. Advances and limitations of individual-based models to analyze and predict dynamics of mangrove forests, **Aquat. Bot**, 2008.
doi:10.1016/j.aquabot.2007.12.015.

CAHOON, D. R. et al. Coastal wetland vulnerability to relative sea-level rise: wetland elevation trends and process controls. In: VHOEVEBN J.T.A. et al. (Eds.), **Wetlands and Natural Resource Management**. Ecological Studies, vol. 190. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, pp. 271–292, 2006.

CORNEJO, R. H. Remote Sensing and Ethnobotanical Assessment of The Mangrove Forest Changes in The Navachiste-San Ignacio-Macapule Lagoon Complex, Sinaloa, Mexico. **Ecology and Society** 10: 16 [online]. 2005.

DEANGELIS, D. L.; MOOIJ, W. M. Individual-based modeling of ecological and evolutionary processes. **Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.** 36, p. 147–168, 2005.

DI NITTO, D. et al. Mangroves facing climate change: landward migration potential in response to projected scenarios of sea level rise, **Biogeosciences Discuss.**, 10, p. 3523–3558, doi:10.5194/bgd-10-3523-2013, 2013.

DOYLE, T. W.; GIROD, G. F. The frequency and intensity of Atlantic hurricanes and their influence on the structure of south Florida mangrove communities. In: H. DIAZ & R. PULWARTY, eds., **Hurricanes, Climatic Change and Socioeconomic Impacts: A Current Perspective**, p. 111 128: New York, Westview Press, p. 325, 1996.

DOYLE, T.W.; GIROD, G.F.; BOOKS, M.A. Chapter 12: modeling mangrove forest migration along the southwest coast of Florida under climate change. In: NING, Z.H., TURNER, R.E., DOYLE, T.W., ABDOLLAHI, K. (Eds.), **Integrated Assessment of the Climate Change Impacts on the Gulf Coast**

Region. GRCCC and LSU Graphic Services, Baton Rouge, LA, p. 211–221, 2003.

ERFTEMEIJER, P. L. A. A new technique for rapid assessment of mangrove degradation: A case study of shrimp farm encroachment in Thailand. **Trees – Structure and Function** 16: p. 204–208, 2002.

ESPINOSA, L.Y.; FLORES, J. A Review of Sea-Level Rise Effect on Mangrove Forest Species: Anatomical and Morphological Modifications. In: **Global Warming Impacts – Case Studies on the Economy, Human Health, and on Urban and Natural Environments**. CASALEGNO, S. (ed). Published by InTech Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia. p. 253–276, 2011.

FATOYINBO, T.E. et al. Landscape-scale extent, height, biomass, and carbon estimation of Mozambique's mangroves forests with Landsat EMT+ and Shuttle Radar Topography Mission elevation data. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 113, 2008. G02S06, doi:10.1029/2007JG000551.

FARACO, L. F. D.; ANGRETO-FILHO, J. M.; LANA, P. C. Methodology for Assessing the vulnerability of mangroves and fisherfolk to climate change. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, 5(2): p. 205–223, 2010.

FIELD, C. Impacts of expected climate change on mangroves. **Hydrobiologia** 295, p. 75–81, 1995.

GILMAN, E.L. et al. Adapting to Pacific Island mangrove responses to sea level rise and climate change, **Climate Research**, 32, (3) p. 161–176, 2006. ISSN 0936-577X.

GILMAN, E.L. et al. Threats to mangroves from climate change and adaptation options, **Aquat. Bot.**, 89, p. 237–250, 2008. doi:10.1016/j.aquabot.2007.12.009.

GIRI, C. et al. Status and Distribution of Mangrove Forests of the World Using Observation Satellite Data. **Global Ecology and Biogeography** 20, p. 154–159, 2011. doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x.

GRIMM, V. Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned and what could we learn in the future? **Ecol. Model.** 115, p. 129–148, 1999.

HEUMANN, B.W. Satellite Remote Sensing of Mangrove Forests: Recent Advances and future opportunities. **Progress in Physical Geography** 35 (1): p. 87–108, 2011.

HUANG, X.; ZHANG, L.; LE WANG. Evolution of Morphological Texture Features of Mangrove Forest Mapping and Species Discrimination Using Multispectral IKONOS Imagery. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, Vol. 6, No. 3, July 2009.

IPCC: **Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. M.L. PARRY, O. F. CANZIANI, J. P. PALUTIKOF, P. J. VAN der LINDEN.; C. E. HANSON, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 976 p, 2007.

IPCC: **Working group I contribution to the IPCC fifth assessment Report (AR5), climate change 2013: the physical science basis**. **Coordinating Lead Authors:** THOMAS STOCKER (Switzerland), QIN DAHE (China), GIAN-KASPER PLATTNER (Switzerland). 2216 p, 2013.

KOVACS, J.; WANG, J.; FLORES-VERDUGO, F. MAPPING Mangrove Leaf Area Index at the Species Level Using IKONOS and LAI-2000 Sensors for the Agua Brava Lagoon, Mexican Pacific. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 62: p. 377-384, 2005.

KJERFV, B. Morphodynamics of muddy environments along the Atlantic coasts of North and South America. In: **Muddy Coasts Of The World: Processes, Deposits and Functions**. 1s ed., Amsterdam, Elsevier Science. p. 479–532, 2002.

KUENZER, C. Remote Sensing of Mangrove Ecosystems: A Review. **Remote Sens** 3, p. 878-978, 2011.

LAFFOLEY, D.d'A; GRIMSDITCH, G. (eds). **Mangroves. The Management of Natural Coastal Carbon Sinks**. D.d.A. Laffoley and G. Grimsditch. Gland Switzerland, IUCN: p. 53 pp, 2009.

LARA, R. J.; COHEN, M. C. L. Sensoriamento remoto. In: **Os manguezais da costa Norte Brasileira**. MARCUS, E. B. F. (org) 1ª ed. Maranhão: Fundação Rio Bacanga, p.13-30. 2003.

LOVELOCK, C. E.; ELLISON, J. C. Vulnerability of mangroves and tidal wetlands of the great barrier reef to climate change. In: JOHNSON, J.E., MARSHALL, P.A. (Eds.), **Climate Change and the Great Barrier Reef: A Vulnerability Assessment**. Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, Australia, pp. 237–269, 2007.

LUGO, A.E.; SNEDAKER, S.C. The Ecology of Mangroves. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Vol. 5, p. 39-64, 1974.

LUGO, A.E. Mangrove ecosystems: successional or steady state? **Biotropica** 12: 65-73, 1980.

MCLEOD, E e SALM, R.V. 2006. **Managing Mangroves for Resilience to Climate Change**. IUNC, Gland, Switzerland. 64 p. 2006.

MURRAY, B.C. et al. **Payments for blue carbon: Potential for protecting threatened coastal habitats**. Nicolas Institute Policy Brief, 2010. 8 p.

NELLMANN, C. et al. (Eds). **Blue carbon. A rapid response assessment, United Nations Environment Programme**. GRID-Arendal, 2009. ISBN: 978-82-7701-060-1, www.grida.no.

NEWTON, A.C. et al. Remote sensing and the future of landscape ecology. **Progress in Physical Geography** 33: p. 528–546, 2009.

RASOLOFOHARINORO, M. et al. A remote sensing based methodology for mangrove studies in Madagascar. **International Journal of Remote Sensing** 19: p. 1873–1886, 1998.

REBELO-MOCHEL, F.; PONZONI, F. J. Spectral characterization of mangrove leaves in the Brazilian Amazonian coast: Turiaçu Bay, Maranhão State. **Annals of the Brazilian Academy of Science**.79 (4): p. 683-692, 2007.

SANDS, P.J.; LANDSBERG, J.J. Parameterisation of 3-PG for plantation

grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management** , 163:273-292, 2002.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. et al. Brazil mangroves. **Aquatic Ecosystem Health and Management** Volume 03, Issue 4, p. 561-570, 2000.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; CONTRÓN-MOLERO, G. SOARES, M.L.G. Mangroves as indicators of sea-level change in the muddy coasts of the world. In: Wang, Y. and Healy, T. (eds.), **Muddy Coasts. United Kingdom: Elsevier**, pp. 245-262, 2002.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; COELHO JR, C.; TOGNELLA-DE-ROSA, M. **Manguezais**. Ática, 1ed, São Paulo: 2004

SOARES, M.L.G. A conceptual model for responses of mangrove forest to sea level rise. **Journal of Coastal Research**, especial issue, p. 267-271, 2009.

SOLOMON, S. et al. (Eds.), Climate Change: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

SOLOMON, S et al. Irreversible Climate Change Due to Carbon Dioxide Emissions. **Proct. Natl. Acad. Sci. U.S.A.** 106 (6): p. 1704-1709, 2010.

SOUZA-FILHO, P.W.M.S. Costa de macromaré da Amazônia: Cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. **Revista Brasileira de Geofísica** 23 (4): p. 427-435, 2005.

SPALDING, M.; KAINUMAAND, M.; COLLINS, L. **World mangrove atlas**. London, Washington D. C. ISBN 978-1-84407-657-4. 319 pp, 2010.